

**Effiziente Entwicklung eines menschenzentrierten  
Querführungsassistenzsystems mit einem Fahrsimulator**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik der  
Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades  
eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Gregor Hiesgen  
aus  
Oberhausen

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Schramm  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Arnold Kistner  
Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2011



## Danksagung

Bei der Anfertigung meiner Doktorarbeit wurde ich von einer Vielzahl von Menschen auf meinem Weg begleitet und unterstützt. Daher möchte ich diese Gelegenheit nutzen, um meinen Dank zum Ausdruck zu bringen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dieter Schramm, der mir die Gelegenheit gegeben hat, an einem besonders interessanten Thema zu forschen. Insbesondere für das Vertrauen, das er in mich gesetzt hat, und die Freiheit in der Ausgestaltung der Forschungsschwerpunkte bin ich ihm zu höchstem Dank verpflichtet. Ich danke meinem Zweitgutachter, Herrn Prof. Arnold Kistner, von der Universität Stuttgart für die Übernahme des Korreferates und die wissenschaftliche Betreuung. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Ferdinand Dudenhöffer und Herrn Professor Andrés Kecskeméthy für die fachlichen Anmerkungen zu meiner Arbeit und den reibungslosen Ablauf des Promotionsverfahrens danken.

Insbesondere zu Beginn meiner Promotionszeit war Professor Thorsten Brandt einer meiner wichtigsten wissenschaftlichen Ansprechpartner am Lehrstuhl für Mechatronik. Dafür möchte ich mich ganz besonders bedanken. Weiterhin danke ich Herrn Professor Markus Bröcker für die fachliche Begleitung.

Der im Rahmen dieser Arbeit beschriebene und angewendete Fahrsimulator wurde in wesentlichen Teilen in vielen gemeinsamen Arbeitsstunden mit Herrn Dr. Benjamin Hesse aufgebaut. Wir haben uns stets nachhaltig ergänzt und sind auch privat miteinander freundschaftlich verbunden.

Ich danke meinen Kolleginnen und Kollegen, die mir jederzeit fachliche Unterstützung offerierten und die den Lehrstuhl für Mechatronik zu einem Arbeitsplatz mit persönlicher Atmosphäre gemacht haben. Insbesondere auf den jährlichen Doktorandenseminaren konnten in zahlreichen Diskussionen fachliche Anreize geschaffen werden.

Weiterhin möchte ich allen Studentinnen und Studenten danken, die in wissenschaftlichen Arbeiten oder durch ihre Hilfskrafttätigkeit mit großem Einsatz zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, die in jeglicher Hinsicht die Grundsteine für meinen Weg gelegt hat und mir immer Sicherheit und Rückhalt gegeben hat. Besonders hervorheben möchte ich meine langjährige Freundin Miriam Kuhlkamp, die mich jederzeit bedingungslos unterstützt hat und mir in schwierigen Zeiten zur Seite stand.



---

## Abstract

---

Modern Driver Assistance Systems raise the level of vehicle safety in an extensive degree and therefore contribute to the decrease of the overall accident number. While passive measures have been addressed for a long time and their prospects to lower accident numbers seem to be depleted, active systems will contribute to traffic safety for future vehicles exceedingly.

Due to the continuous development in the sector of environment sensor systems for vehicles and the computing power of modern micro-controllers highly sophisticated systems can be realized. The challenge during the development process of modern Driver Assistance Systems lies in the parallel consideration of the technical implementation and the definition of Human Machine Interfaces. Especially the development of an optimal HMI is of vital importance.

In this thesis a human-centered lateral guidance system, composed of the three subsystems lane keeping assistance, lane departure warning and lane change assist, is considered. Furthermore an optimized development process for suchlike systems is suggested. By means of modern powerful simulation systems the overall developmental period can be shortened and costs can be reduced.

In order to realize the lateral guidance system an optimal steer angle is calculated with potential field methods. Comparing the current driver steer angle and the optimal steer angle leads to a deviation, which is communicated to the driver by means of an overlay torque at the steering wheel. The lane change assist is realized with a Fuzzy based control approach. The result is a continuously scaled lane change hazard.

The initial system design as well as the selection of control approaches results from the simulation of physical models of the subsystems. Suitable driver models are chosen and an overall model (driver, vehicle, assistance system) is affiliated. Consequently optimized control and assistance parameters can be determined ahead of the prototype phase, which assures a good functionality and the stability of the system.

The subsequent development step is the design of the Human Machine Interface. The considered lane guidance assistance system primarily interacts by means of overlay torques at the steering wheel. A continuous lane guidance feedback is assured in addition to haptic warnings in the case of unintended lane departure. The lane change assist communicates the different levels of a lane change hazard by means of colored LED in the rear view mirrors on each side. In the event of very critical situations the driver is alerted by a haptic intervention at the steering wheel as well as an acoustic warning. The fusion of the described subsystems for lateral guidance assistance is done with respect to the driver's intention. The system is continuously adapted to the current intention. Among others a Kalman-filter is used to detect the effective driver steering torque.

The final step during this thesis is the experimental validation of the system using a driving simulator. The interaction of driver and assistance system can be closely investigated in a real vehicle. That enables the evaluation of the proposed system. The simulator is equipped with a force feedback steering wheel and the lateral guidance assistance system. Large scale projections and a realized field of view of almost 360 deg lead to a high level of immersion. Experiments in that simulator therefore can be used for further system optimization.

The interpretation of the simulator experiments are done on the basis of subjective questionnaires and on objective measurements of vehicle states. The developed lateral guidance assistance system contributes to the safety significantly. The task of lane keeping as well as the task of lane changing is easier using the system. The designed human machine interface was judged as easy to understand and highly intuitive. The quantitative analysis of vehicle states shows a reduction of the mean lateral deviation when using the assistance system of approximately 50 %. The usage of the simulation based method to parameterize human centered assistance systems has been validated successfully. The future use of the develop system is an essential contribution to vehicle safety.

---

## Kurzfassung

---

Moderne Fahrerassistenzsysteme erhöhen die Fahrzeugsicherheit und reduzieren somit die Unfallzahlen. Während die passiven Maßnahmen weitgehend ausgereizt zu sein scheinen, versprechen aktive Sicherheits- und Assistenzsysteme in zukünftigen Fahrzeuggenerationen eine weitere deutliche Steigerung der Fahrzeugsicherheit. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrzeugumfeldsensorik und der Rechenleistung der Mikrocontroller können zunehmend komplexere Systeme realisiert werden. Die Herausforderung bei der Entwicklung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme liegt sowohl in der technischen Umsetzung als auch in der Definition der Schnittstellen zum Menschen. Insbesondere die frühe Integration des Menschen in den Entwicklungsprozess ist von entscheidender Bedeutung.

In der vorliegenden Arbeit wird ein menschenzentriertes Querführungsassistenzsystem, bestehend aus den drei Teilsystemen Bahnführungs-, Spurverlassens- und Spurwechselsassistenten, vorgestellt. Weiterhin wird eine Entwicklungsmethode für derartige Systeme gezeigt. Durch den Einsatz moderner Simulationskonzepte können sowohl Entwicklungszeit als auch Kosten reduziert werden.

Die Realisierung des Bahnführungsassistenten erfolgt durch die Bestimmung des optimalen Lenkwinkels auf Basis von potentialfeldbasierten Methoden. Dieser Lenkwinkel wird mit dem Fahrerlenkwinkel verglichen und unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrerinteraktion durch ein Überlagerungsmoment am Lenkrad kommuniziert. Der Spurwechselsassistent wird mit einem Fuzzy-basierten Ansatz realisiert. Als Ergebnis resultiert ein kontinuierlich skaliertes Spurwechselgefahrepotential.

Die Systemauslegung und die Auswahl der Regelansätze erfolgt zunächst durch Simulation physikalischer Modelle der Teilsysteme. Es werden geeignete Fahrermodelle ausgewählt und ein Modell für das Gesamtsystem Fahrer, Fahrzeug und Assistenzsystem hergeleitet. Folglich können bereits vor der Prototypenphase regelungstechnisch optimale Assistenzsystemparameter bestimmt sowie die Stabilität des Gesamtsystems im linearen Bereich gewährleistet werden.

Im nächsten Entwicklungsschritt wird die Auslegung der Schnittstelle zum Fahrer definiert. Der Bahnführungs- und Spurverlassensassistent interagiert vorrangig durch Überlagerungsmomente am Lenkrad mit dem Fahrer und garantiert eine kontinuierliche Spurführung sowie eine haptische Warnung im Fall des unbeabsichtigten Spurverlassens. Der Spurwechselassistent kommuniziert die mehrstufigen Eskalationsgrade für eine Spurwechselgefahr durch LED-Warnleisten in den Fahrzeugaußenspiegeln. In kritischen Fahrsituationen wird dem Fahrer zusätzlich durch einen haptischen Lenkeingriff und akustische Warnungen assistiert. Die Fusionsstrategie der einzelnen Systeme zum menschenzentrierten Querführungsassistenzsystem wird kontinuierlich auf Basis der aktuellen Fahrerintention adaptiert. Dazu wird unter anderem ein Fahrerlenkmomentbeobachter auf Basis des KALMAN-Filters implementiert.

Das Assistenzsystem wird abschließend in einem für diese Anwendung entwickelten Fahrsimulator experimentell erprobt. Somit kann die Interaktion zwischen Fahrer, Assistenzsystem und Fahrzeug evaluiert werden. Der Simulator verfügt über ein Force-Feedback-Lenkrad und wird mit dem Querführungsassistenzsystem ausgestattet. Der realisierte Sichtwinkel von nahezu 360 Grad ermöglicht einen hohen Immersionsgrad, so dass auf Basis der Simulator-Probandenstudie weitere Systemoptimierungen durchgeführt werden können. Die Auswertung der Probandenstudie erfolgt auf der subjektiven Ebene mit einem Fragebogen und durch die Messung charakteristischer Fahrzeugkenngrößen. Das entwickelte Querführungsassistenzsystem steigert signifikant das Sicherheitsgefühl sowohl in Hinblick auf die Spurführungs- als auch auf die Spurwechsel Fahraufgabe. Die über die Mensch-Maschine-Schnittstelle definierten Interaktionskanäle werden überwiegend als intuitiv und leicht verständlich bewertet. Die quantitative Analyse im Simulator zeigt, dass die mittlere Querabweichung des Fahrzeugs in der Fahrspur um die Hälfte reduziert werden konnte. Der Einsatz der entwickelten Methode zur Parametrierung menschenzentrierter Fahrerassistenzsysteme wurde durch die Studie erfolgreich validiert. Der zukünftige Einsatz des Systems in realen Fahrzeugen leistet einen essentiellen Beitrag zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit.



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>vii</b>
<b>Notation</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Motivation und Struktur der Arbeit</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen zu Fahrerassistenzsystemen und Fahrsimulatoren</b>	<b>5</b>
2.1 Entwicklungsmethodik und Bewertung von FAS . . . . .	6
2.1.1 Definition von Assistenz und MMS . . . . .	10
2.2 Fahrsimulatoren in Forschung und Entwicklung . . . . .	13
2.2.1 Auszug aktueller Fahrsimulatoren in der Forschung . . . . .	15
2.3 Grundlagen menschzentrierter Fahrerassistenzsysteme . . . . .	19
2.3.1 Mensch-Maschine-Schnittstelle/Human-Machine-Interface . . . . .	20
2.3.2 Spurverlassens-, Spurhalte- und Bahnführungsassistent . . . . .	27
2.3.3 Spurwechselassistent . . . . .	31
<b>3 Fahrsimulatorkonzept des Lehrstuhls für Mechatronik</b>	<b>37</b>
3.1 Struktur des Fahrsimulatorkonzeptes . . . . .	38
3.1.1 Fahrsimulatoren am Lehrstuhl für Mechatronik . . . . .	40
3.2 Modellbildung und Simulation . . . . .	41
3.2.1 Strecken- und Szenarienerstellung . . . . .	42
3.2.2 Verkehrsmodell . . . . .	43

3.3	Fahrerarbeitsplatz: Cockpit und MMS . . . . .	43
3.3.1	Lenkungsaktor . . . . .	44
3.4	Visualisierung und Sound . . . . .	45
3.5	Anwendungsbeispiele . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Modellbasierte Auslegung des Querführungsassistentensystems</b>	<b>47</b>
4.1	Bahnführungsregler in Kombination mit dem Einspurmodell . . . .	48
4.1.1	Herleitung des Einspurmodells . . . . .	48
4.1.2	Linearisierung des PACEJKA-Reifenmodells . . . . .	55
4.1.3	Modellierung des Lenkungssystems . . . . .	55
4.1.4	Parameter des Audi A8 D2 . . . . .	58
4.2	Spurverlassens- und Bahnführungsassistent . . . . .	58
4.2.1	Spurverlassensassistent . . . . .	59
4.2.2	Analytische Reglerauslegung des Bahnführungsassistenten .	62
4.3	Lenkwinkelregelung für den Bahnführungsassistenten . . . . .	63
4.3.1	Potentialfeldbasierte Lenkwinkelbestimmung . . . . .	63
4.3.2	Kaskadierte Regelung . . . . .	66
4.3.3	Bestimmung der optimalen Reglerparameter . . . . .	68
4.3.4	Vergleich der Regelansätze . . . . .	71
4.4	Integration von Fahrermodellen in den Gesamtregelkreis . . . . .	71
4.4.1	Psychologische Fahrermodelle . . . . .	73
4.4.2	Technische Fahrermodelle . . . . .	74
4.4.3	Analyse ausgewählter Fahrermodelle . . . . .	80
4.5	Stabilitätsnachweis des resultierenden Gesamtsystems . . . . .	87
4.6	Erweiterung um ein Spurwechselassistentensystem . . . . .	92
4.6.1	Fuzzy-Methode . . . . .	92
4.6.2	Ein- und Ausgangsvariablen für den Spurwechselassistenten	94
4.6.3	Fuzzyfizierung . . . . .	95
4.6.4	Inferenz . . . . .	99
4.6.5	Defuzzyfizierung . . . . .	99
4.6.6	Ergebnisse . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle</b>	<b>105</b>
5.1	Visuelle Anzeigeelemente . . . . .	107
5.1.1	Spurverlassens- und Bahnführungsassistent . . . . .	107
5.1.2	Spurwechselassistent . . . . .	108
5.2	Akustische Warnungen . . . . .	110
5.2.1	Spurverlassens- und Bahnführungsassistent . . . . .	110
5.2.2	Spurwechselsassistent . . . . .	110
5.3	Haptische Interaktion . . . . .	111
5.3.1	Spurverlassens- und Bahnführungsassistent . . . . .	112
5.3.2	Spurwechselassistent . . . . .	115
5.3.3	Fahrerlenkmomentbeobachter . . . . .	115

---

<b>6</b>	<b>Systemevaluierung in einer Fahrsimulatorstudie</b>	<b>121</b>
6.1	Versuchsaufbau und Preprocessing . . . . .	121
6.1.1	Grundaufbau des Ford Fiesta-Simulators . . . . .	122
6.1.2	FAS- und Simulations-Parameter . . . . .	123
6.1.3	Szenario und Streckenverlauf . . . . .	124
6.2	Versuchsdurchführung . . . . .	125
6.2.1	Fahraufgabe . . . . .	126
6.3	Versuchsauswertung und Postprocessing . . . . .	126
6.3.1	Quantitative Analyse . . . . .	126
6.3.2	Bahnführungsassistent . . . . .	127
6.3.3	Cluster-Analyse . . . . .	130
6.3.4	Subjektive und qualitative Analyse . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung, wissenschaftlicher Beitrag und Ausblick</b>	<b>137</b>
7.1	Zusammenfassung und wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	137
7.2	Ausblick . . . . .	139
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>141</b>
A.1	Parameter für die Spurwechseltrajektorie . . . . .	141
A.2	Parameter des Audi A8 D2 . . . . .	142
A.3	Reglerparameter der Bahnführungsassistenzenzsysteme . . . . .	142
A.4	Fragebögen zur Fahrsimulatorstudie . . . . .	143
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>147</b>



---

## Notation

---

### Koordinatensysteme (KS)

Die im Rahmen der Arbeit verwendete Notation sowie die wichtigsten Bezugssysteme auf Basis von Abbildung 0.1 sollen zunächst eingeführt werden.

Formelzeichen	Bedeutung
$\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{E}}}: (\mathbf{E}^*, {}_E\mathbf{e}_x, {}_E\mathbf{e}_y, {}_E\mathbf{e}_z)$	Erdfestes KS
$\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{V}}}: (\mathbf{V}^*, {}_V\mathbf{e}_x, {}_V\mathbf{e}_y, {}_V\mathbf{e}_z)$	Fahrzeugfestes KS
$\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{S}}}: (\mathbf{S}^*, {}_S\mathbf{e}_x, {}_S\mathbf{e}_y, {}_S\mathbf{e}_z)$	Straßenfestes KS
$\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{F}}}: (\mathbf{F}^*, {}_F\mathbf{e}_t, {}_F\mathbf{e}_n, {}_F\mathbf{e}_z)$	Führungskoordinatensystem

Die Fahrzeugbewegung wird in Relation zum erdfesten Bezugssystem  $\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{E}}}$  beschrieben. Das fahrzeugfeste Bezugssystem  $\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{V}}}$  (*Vehicle*) ist im Fahrzeugschwerpunkt verankert und um den Gierwinkel  $\psi$  gegenüber dem erdfesten Bezugssystem  $\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{E}}}$  gedreht. Das straßenfeste Bezugssystem  $\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{S}}}$  kann genutzt werden, um Fahrzeugbewegungen relativ zum Straßensegment zu referenzieren. Das Bezugssystem  $\overset{\uparrow}{\underset{\rightarrow}{\mathbf{F}}}$  ist das trajektorienfeste **Frenet**-System und wird zur Berechnung der Querabweichung  $\tilde{y}$  und der Winkelabweichung  $\tilde{\psi}$  genutzt. Die wichtigen Abmessungen des Fahrzeugs sind durch die Spurbreite  $b_V$ , den Schwerpunktabstand zur Vorderachse  $l_V$  und zur Hinterachse  $l_h$  gegeben. Mit  $\delta$  wird der Lenkwinkel, also der Winkel zwischen Radmittelebene und der Fahrzeuglängsachse, bezeichnet.

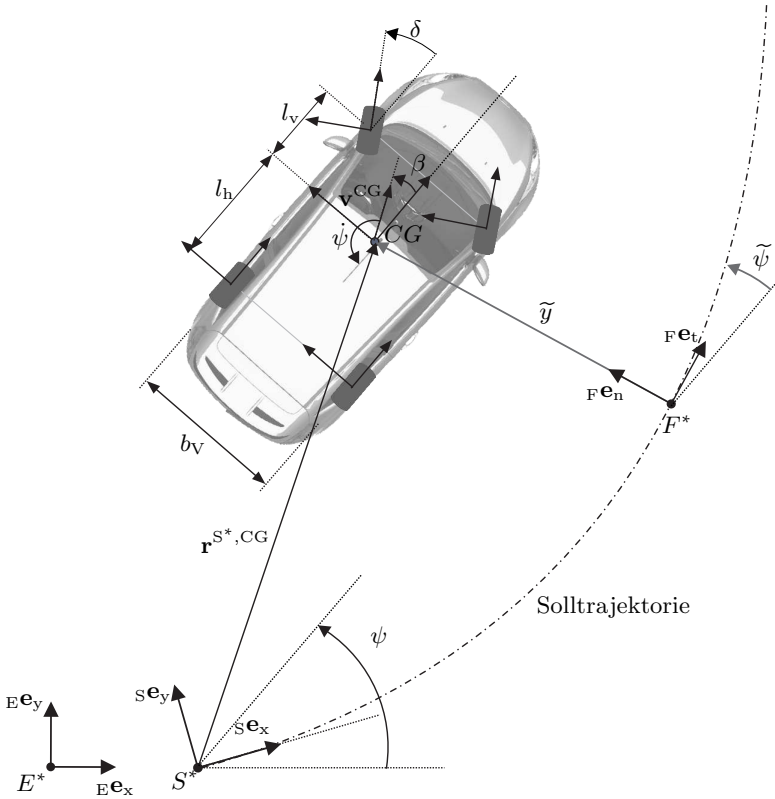


Abbildung 0.1: Kinematische Betrachtung der Bezugssysteme

## Verwendete Symbole

Die verwendete Systematik der Notation stellt sich beispielsweise wie folgt dar:

${}_F\mathbf{r}^{A,B}$ : Ortsvektor von A nach B dargestellt in F

${}_E\mathbf{v}_F^A$ : Geschwindigkeit des Punktes A relativ zu E dargestellt in F

${}_Fv_x^A$ : x-Geschwindigkeit des Punktes A relativ zu E dargestellt in F

${}_F\mathbf{a}^A$ : Beschleunigung des Punktes A relativ zu E dargestellt in F

${}_Fa_x^A$ : x-Beschleunigung des Punktes A relativ zu E dargestellt in F

Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
Lateinische Buchstaben:		
$\mathbf{a}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung
$\mathbf{A}$	–	Systemmatrix
$\mathbf{A}_A$	–	Systemmatrix des Lenkmomentbeobachters
$\mathbf{A}_D$	–	Systemmatrix des Lenkungs-Störmodells
$\overline{A}$	–	FUZZY-Menge
$a_{\text{Si}}$	–	Sigmoidenparameter
$a_i$	–	Parameter für die PADÉ-Totzeitapproximation (Nennerpolynom)
$\mathbf{a}_x^{\text{CG}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Schwerpunktsbeschleunigung in ${}_v\mathbf{e}_x$ -Richtung
$\mathbf{a}_y^{\text{CG}}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Schwerpunktsbeschleunigung in ${}_v\mathbf{e}_y$ -Richtung
$\mathbf{B}$	–	Systemeingangsmatrix
$\mathbf{B}_D$	–	Eingangsmatrix des Lenkungs-Störmodells
$\overline{B}$	–	FUZZY-Menge
$b_i$	–	Parameter für die PADÉ-Totzeitapproximation (Zählerpolynom)
$b_V$	m	Spurbreite des Fahrzeugs
$b_S$	m	Fahrspurbreite der Straße
$\mathbf{B}_A$	–	Eingangsmatrix des Lenkmomentbeobachters
$\mathbf{B}_{\text{SC}}$	–	Regeleingangsmatrix
$\mathbf{B}_{\text{SD}}$	–	Störeingangsmatrix
$\mathbf{C}$	–	Messmatrix
$\mathbf{A}_A$	–	Messmatrix des Lenkmomentbeobachters
$\mathbf{C}_M$	–	Messmatrix
$\mathbf{C}_D$	–	Messmatrix des Lenkungs-Störmodells
$\overline{C}$	–	FUZZY-Menge
$c_L$	$\frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	Lenkungssteifigkeit
$c_\alpha^{v'}$	$\frac{\text{N}}{\text{rad}}$	Kombinierte Lenkungs- und Reifensteifigkeit
$c_\alpha^v$	$\frac{\text{N}}{\text{rad}}$	Schräglaufsteifigkeit an der Vorderachse
$c_\alpha^h$	$\frac{\text{N}}{\text{rad}}$	Schräglaufsteifigkeit an der Hinterachse
$D$	–	LEHR'SCHES Dämpfungsmaß
$\mathbf{D}_A$	–	Durchgangsmatrix des Lenkmomentbeobachters
$\mathbf{D}_D$	–	Durchgangsmatrix des Lenkungs-Störmodells
$D_{\text{RE}}$	–	RENSKI-Fahrermodellreglerübertragungsfunktion
$\mathbf{D}_{\text{SC}}$	–	Regeldurchgangsmatrix

Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
$\mathbf{D}_{SD}$	–	Stördurchgangsmatrix
$d_L$	$\frac{Ns}{rad}$	Lenkraddämpfungskonstante
$d_{LD}$	$\frac{Ns}{rad}$	Lenksystemdämpfung des FF-Aktors
$d_{LG}$	$\frac{Ns}{rad}$	Lenkgetriebedämpfungskonstante
$d_{Radar,min}$	m	Minimal benötigte Sensorreichweite
$dim_{Fuzzy}$	–	Gesamtdimension der Inferenzmatrix
$\mathbf{e}$	1	Einheitsvektor
$EG$	$\frac{rad \cdot s^2}{m}$	Eigenlenkgradient
$f_{SVW}$	Hz	Visuelle Spurverlassensassistent-Warnfrequenz
$f_{SVW,hap}$	Hz	Haptische Spurverlassensassistent-Warnfrequenz
$f_{SWA,hap}$	Hz	Haptische Spurwechselassistent-Warnfrequenz
$F_{AS}(s)$	$\frac{rad}{m}$	Gesamtübertragungsfunktion des ASHKENS-Fahrermodellreglers
$F_y^h$	N	Reifenseitenführungskraft an der Hinterachse
$F_y^v$	N	Reifenseitenführungskraft an der Vorderachse
$F_y(s)$	$\frac{m}{rad}$	Querpositionsübertragungsfunktion
$F_{y0,KA}(s)$	$\frac{m}{m}$	Übertragungsfunktion des offenen kaskadierten Regelkreises
$F_{y,PF}(s)$	$\frac{m}{m}$	Gesamtsystemübertragungsfunktion mit potentialfeldbasiertem Regler
$F_{z\delta,KA}(s)$	$\frac{m}{rad}$	Lenkwinkel-Störübertragung mit kaskadiertem Regler
$F_{z\delta,PF}(s)$	$\frac{m}{rad}$	Lenkwinkel-Störübertragung mit potentialfeldbasiertem Regler
$F_{z\psi,KA}(s)$	$\frac{m}{rad}$	Fahrzeugorientierungs-Störübertragung mit kaskadiertem Regler
$F_{z\psi,PF}(s)$	$\frac{m}{rad}$	Fahrzeugorientierungs-Störübertragung mit potentialfeldbasiertem Regler
$F_{zy,KA}(s)$	$\frac{m}{rad}$	Fahrzeugquerpositions-Störübertragung mit kaskadiertem Regler
$F_{zy,PF}(s)$	$\frac{m}{rad}$	Fahrzeugquerpositions-Störübertragung mit potentialfeldbasiertem Regler
$F_\beta(s)$	–	Schwimmwinkelübertragungsfunktion
$F_\delta(s)$	–	Lenksystemübertragungsfunktion
$F_\psi(s)$	–	Gierwinkelübertragungsfunktion



Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
$F_{\psi,\text{PF}}(s)$	$\frac{\text{rad}}{\text{rad}}$	Gierwinkelübertragungsfunktion innere Winkelregelung mit potentialfeldbasiertem Regler
$F_{\psi,\text{KA}}(s)$	$\frac{\text{rad}}{\text{rad}}$	Gierwinkelübertragungsfunktion der inneren Kaskade
$F_{\nu}(s)$	$\frac{\text{rad}}{\text{rad}}$	Kurswinkelübertragungsfunktion des Einspurmodells
$F_{y,\text{KA}}(s)$	$\frac{\text{m}}{\text{m}}$	Gesamtsollwertübertragungsfunktion des kaskadierten Reglers
$g$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Erdbeschleunigung
$G_{n,k}(z)$	–	Übertragungsfunktion PADÉ-Approximation
$\Theta_{\text{H}}(x)$	–	HEAVISIDE-Funktion
$i_{\text{L}}$	–	Lenkübersetzung
$J$	–	Gütefunktion zur Bewertung der Bahnführungslenkwinkelregler
$J_{\text{FM}}$	–	Gütefunktion zur Bewertung des Fahrermodells
$J_{\text{L}}, d_{\text{L}}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Lenkrad-Trägheitsmoment
$J_{\text{LG}}, d_{\text{LG}}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Lenkgetriebe-Trägheitsmoment
$J_{\text{LK}}, d_{\text{LK}}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Lenkkinematik-Trägheitsmoment
$J_{\text{y}}$	–	Gütefunktion zur Bewertung der Querpositionsfolge des Fahrermodells
$J_{\text{z}}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Gierträgheitsmoment
$J_{\psi}$	–	Gütefunktion zur Bewertung der Orientierungsfolge des Fahrermodells
$k$	–	Zählergrad
$k_1$	–	Skalierungsfaktor (Integral/Maximum) für die Bahnfolgereglergütefunktion
$k_{\text{Assist}}$	$\text{Nm} \cdot \text{rad}$	Verstärkungsfaktor des Bahnführungsassistentenmoments
$k_{\text{b},1}$	–	Skalierungsfaktor (Integral) für die Bahnfolgereglergütefunktion
$k_{\text{b},2}$	–	Skalierungsfaktor (Maximum) für die Bahnfolgereglergütefunktion
$K_{\text{er,AS}}$	–	Proportionaler Fahrermodellreglerverstärkungsfaktor nach ASHKENS
$k_{\text{p}}$	$\frac{\text{N}}{\text{m}}$	Reglergesamtverstärkungsfaktor potentialfeldbasierter Regler

Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
$K_{D,IG}$	–	Differentieller Anteil des PID-Fahrermodells
$k_{\text{Fahrer}}$	–	Fahrerintentionsbasierter Assistenzmomentskalierungsfaktor
$K_{I,IG}$	–	Integraler Anteil des PID-Fahrermodells
$K_{P,IG}$	–	Proportionaler Anteil des PID-Fahrermodells
$k_{\psi}$	$\frac{\text{m}}{\text{rad}}$	Virtuelle Vorausschaudistanz potentialfeldbasierter Regler
$k_{I\psi}$	–	Integraler Basisfaktor des kaskadierten Orientierungsreglers
$K_{I\psi}$	–	Resultierender $I$ -Anteil des kaskadierten Orientierungsreglers
$k_{\text{INT},D}$	–	Differentieller Interaktionskoeffizient zwischen Fahrer und Assistenzsystem
$k_{\text{INT},I}$	–	Integraler Interaktionskoeffizient zwischen Fahrer und Assistenzsystem
$k_{\text{INT},P}$	–	Proportionaler Interaktionskoeffizient zwischen Fahrer und Assistenzsystem
$k_{Py}$	–	Linearer proportionaler Basisfaktor des kaskadierten Querpositionsreglers
$k_{Py0}$	–	Proportionaler Basisfaktor des kaskadierten Querpositionsreglers
$k_{P\psi}$	–	Proportionaler Basisfaktor des kaskadierten Orientierungsreglers
$K_{Py}$	–	Resultierender $P$ -Anteil des kaskadierten Querpositionsreglers
$K_{P\psi}$	–	Resultierender $P$ -Anteil des kaskadierten Orientierungsreglers
$K_{D\psi}$	–	Differentieller $D$ -Anteil des kaskadierten Orientierungsreglers
$k_{\text{DO},1}$	–	Schwimmwinkelverstärkungsanteil des DONGES-Fahrermodells
$k_{\text{DO},2}$	–	Gieratenanteilverstärkungsanteil des DONGES-Fahrermodells
$k_{\text{DO},3}$	–	Relativgierwinkelverstärkungsanteil des DONGES-Fahrermodells

Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
$k_{\text{DO},4}$	–	Querabweichungsverstärkungsanteil des DONGES-Fahrermodells
$k_{\text{DO},5}$	–	Krümmungsverstärkungsanteil des DONGES-Fahrermodells
<b>L</b>	–	KALMANN-Verstärkungsmatrix
$L_a$	–	Vorausschaudistanz des RENSKI-Fahrermodells
$l$	m	Fahrzeugradstand
$l_v$	m	Abstand vom Schwerpunkt zur Vorderachse
$l_h$	m	Abstand vom Schwerpunkt zur Hinterachse
$m$	kg	Fahrzeugmasse
$M$	Nm	Moment
$M_{\text{Aktor}}$	Nm	Drehmoment des FF-Aktors
$M_{\text{Assist}}$	Nm	Fahrerassistenzmoment
$\dot{M}_{\text{Assist,max}}$	$\frac{\text{Nm}}{\text{s}}$	Maximal zulässiger Fahrerassistenzmomentgradient
$M_{\text{Assist,Basis}}$	Nm	Basis-Fahrerassistenzmoment
$M_{\text{Assist,res}}$	Nm	Resultierendes Fahrerassistenzmoment
$M_{\text{Fahrer}}$	Nm	Fahrerhandmoment am Lenkrad
$M_{\text{Fahrer,max}}$	Nm	Maximales Fahrerhandmoment im Komfortbereich
$M_L$	Nm	Resultierendes Drehmoment am Lenkrad
$M_{\text{Servo}}$	Nm	Drehmoment der Servolenkung
$M_{\text{skal,start}}$	Nm	Grenzmoment für die Skalierung des Assistenzmoments
$M_{\text{SVW,rechts}}$	Nm	Maximalmoment des Spurverlassenswarnmoments nach rechts
$M_{\text{SVW,links}}$	Nm	Maximalmoment des Spurverlassenswarnmoments nach links
$M_{\text{SWA,rechts}}$	Nm	Maximalmoment des Spurwechselassistenzmoments nach rechts
$M_{\text{SWA,links}}$	Nm	Maximalmoment des Spurwechselassistenzmoments nach links
$n$	–	Nennerordnung
$n_{\text{dyn}}$	m	Dynamischer Reifennachlauf
$n_{\text{lat}}$	–	Dimension der lateralen Fuzzyfizierung
$n_{\text{lon}}$	–	Dimension der longitudinalen Fuzzyfizierung

Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
$n_{\text{vel}}$	–	Dimension der Geschwindigkeits-Fuzzyfizierung
$n_{\text{kin}}$	m	Kinematischer Reifennachlauf
$n^{\text{v}}$	m	Resultierender Reifennachlauf an der Vorderachse
$P_{\text{RE}}$	–	RENSKI-Prädiktionsübertragungsfunktion
$R$	m	Radius
$R_{\text{RE}}$	–	RENSKI-Fahrervorausschaureglerübertragungsfunktion
$R_y(s)$	$\frac{\text{rad}}{\text{m}}$	Querpositions-Reglerübertragungsfunktion des kaskadierten Reglers
$R_\psi(s)$	$\frac{\text{rad}}{\text{rad}}$	Orientierungs-Reglerübertragungsfunktion des kaskadierten Reglers
$r_{\text{dyn}}$	m	dynamischer Reifenradius
$s$	m	Bogenlänge
$t$	s	(Simulations)-Zeit
$t_0$	s	Startzeitpunkt
$t_{\text{cog}}$	s	Kognitive Fahrerverzögerung
$t_{\text{end}}$	s	Simulationsendzeitpunkt
$t_i$	s	Simulationszeitpunkt
$t_{\text{mot}}$	s	Motorische Fahrerverzögerung
$t_{\text{Reaktion}}$	s	Reaktionszeit des Fahrers
$t_{\text{System}}$	s	Systemrechenzeit
$T$	s	Zeitkonstante einer Übertragungsfunktion
$TLC$	s	Zeit bis zum Spurmarkierungslinienüberfahren
$TLC_{\text{max}}$	s	Maximale Zeit bis zum Spurmarkierungslinienüberfahren
$T_1$	s	Kognitive Verzögerung des DONGES-Fahrermodells
$T_{1y}$	s	Basis-Zeitkonstante des kaskadierten Querpositionsreglers
$T_{1\psi}$	s	Basis-Zeitkonstante des kaskadierten Orientierungsreglers
$T_{\text{I,AS}}$	s	Führungskonstante für das Fahrermodell nach ASHKENS
$T_K$	s	Reaktionszeit des RENSKI-Fahrermodells

Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
$T_{L,AS}$	s	Führungskonstante für das Fahrermodell nach ASHKENS
$T_{Tot}$	s	Totzeit
$T_V$	s	Kognitive Verzögerung des DONGES-Fahrermodells
$T_{V\psi}$	s	Adaptierte Zeitkonstante des kaskadierten Orientierungsreglers
$T_{Vy}$	s	Adaptierte Zeitkonstante des kaskadierten Querspositionsreglers
$T_{z1}$	s	Zeitkonstante im Einspurmodell
$T_{z2}$	s	Zeitkonstante im Einspurmodell
$T_\delta$	s	Zeitkonstante der elektrischen Servolenkung
$\mathbf{u}$	–	Beobachter-Eingangsvektor
$\mathbf{v}$	–	Prozessrauschvektor
$v^{CG}$	$\frac{m}{s}$	Fahrzeuggeschwindigkeit im Schwerpunkt
$v_{ch}$	$\frac{m}{s}$	Charakteristische Geschwindigkeit
$\tilde{v}^{Obj}$	$\frac{m}{s}$	Objektannäherungsgeschwindigkeit
$R_{s,min}$	m	Minimal zulässiger Kurvenradius
$V_{RE}$	–	RENSKI-Regelstreckenübertragungsfunktion
$V_\kappa$	m · rad	Vorsteuerungsverstärkungsfaktor
$\mathbf{w}$	–	Messrauschmatrix
$W$	–	Gesamtlenkverstärkungsfaktor des RENSKI-Fahrermodells
$x_{SIG}$	m	$x$ -Koordinate der Sigmoide
$\mathbf{x}$	–	Lenksystemzustandsvektor
$\dot{\mathbf{x}}$	–	Ableitung des Lenksystemzustandsvektors
$_{HL}\tilde{x}^{Obj}$	m	Longitudinale Objektdistanz hinten links
$_{HR}\tilde{x}^{Obj}$	m	Longitudinale Objektdistanz hinten rechts
$\tilde{y}$	m	Querabweichung Fahrzeug zur Solltrajektorie
$_{HL}\tilde{y}^{Obj}$	m	Laterale Objektdistanz hinten links
$_{HR}\tilde{y}^{Obj}$	m	Laterale Objektdistanz hinten rechts
$\dot{\tilde{y}}$	$\frac{m}{s}$	Querabweichungsänderung Fahrzeug zu Solltrajektorie
$\tilde{y}_0$	m	Initiale Querabweichung Fahrzeug zu Solltrajektorie

Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
$\tilde{y}_{\max}$	m	Maximalwert der Querabweichung zur Solltrajektorie
$\tilde{y}^R$	m	Abstand vom Vorderreifen zur Fahrspurmarkierung
$y_{\text{SIG}}$	m	$y$ -Koordinate der Sigmoide
$\tilde{y}_{\text{TLC}}^{\text{CG}}$	m	Abstand vom Fahrzeugschwerpunkt zur Fahrspurmarkierung
$z_{\delta}$	m	Fahrzeugquerpositionsstörung
$\delta$	rad	Lenkwinkelstörung
$z_{\psi}$	rad	Fahrzeugorientierungsstörung
Griechische Buchstaben:		
$\alpha^h$	rad	Schräglaufwinkel am Hinterreifen
$\alpha^v$	rad	Schräglaufwinkel am Vorderreifen
$\beta$	rad	Schwimmwinkel
$\dot{\beta}$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Schwimmrate
$\delta$	rad	Lenkwinkel
$\dot{\delta}$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Lenkwinkelgeschwindigkeit
$\ddot{\delta}$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	Lenkwinkelbeschleunigung
$\tilde{\delta}$	rad	Differenzlenkwinkel
$\delta_A$	rad	Ackermannlenkwinkel
$\delta_{\text{DO}}$	rad	Resultierender DONGES-Fahrerlenkwinkel
$\bar{\delta}_h$	rad	Temporärer DONGES-Fahrerlenkwinkel
$\delta_L$	rad	Lenkradwinkel
$\dot{\delta}_L$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Lenkradwinkelgeschwindigkeit
$\ddot{\delta}_L$	$\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$	Lenkradwinkelbeschleunigung
$\delta_{\text{Assist}}$	rad	Lenkassistentzwinkel
$\delta_{\text{Assist}}^*$	rad	Fahreradaptierter Lenkassistentzwinkel
$\delta_{\text{Assist,max}}$	rad	Maximaler Lenkassistentzwinkel
$\delta_{L,\text{Assist,max}}$	rad	Maximaler Lenkradassistentzwinkel
$\delta_{L,R}$	rad	Regler-Lenkradwinkel
$\delta_{L,\text{PF}}$	rad	Potentialfeldbasierter Regler-Lenkradwinkel
$\delta_{L,V}$	rad	Vorsteuerungsanteil des Bahnführungslenkradwinkel
$\delta_{L,\text{VF}}$	rad	Vorsteuerungs-Lenkradwinkel
$\delta_{\text{RE}}$	rad	RENSKI-Fahrermodell-Lenkwinkel
$\delta^*$	rad	Lenkwinkel nach dem Lenkgetriebe

Formel -zeichen	Einheit	Bedeutung
$\dot{\kappa}_S$	$\frac{s}{m}$	Fahrspurkrümmungsänderung
$\epsilon$	rad	Referenzwinkel des RENSKI-Fahrermodells
$\kappa_S$	$\frac{1}{m}$	Fahrspurkrümmung
$\nu$	$\frac{rad}{s}$	Ungedämpfte Eigenkreisfrequenz
$\nu_D$	$\frac{rad}{s}$	Gedämpfte Eigenkreisfrequenz
$\nu_K$	rad	Resultierender Fahrzeugkurswinkel
$\sigma$	$\frac{1}{s \cdot rad}$	Abklingkonstante
$\tau_T$	s	Totzeit im DONGES-Fahrermodell
$\bar{\eta}$	s	Menschliches Rauschen im DONGES-Fahrermodell
$\mu_i$	–	FUZZY-Mengen Zugehörigkeitsfunktion
$\psi$	rad	Gierwinkel
$\psi_{ist}$	rad	Istorientierung des Fahrzeugs
$\psi_S$	rad	Sollorientierung der Referenztrajektorie
$\psi_{soll}$	rad	Sollorientierung des Fahrzeugs
$\psi_{SIG}$	rad	Orientierung der Sigmoiden
$\tilde{\psi}$	rad	Relativwinkel zwischen Soll-Fahrspur und Fahrzeuglängsachse
$\dot{\tilde{\psi}}$	$\frac{rad}{s}$	Relativwinkeländerung zwischen Soll-Fahrspur und Fahrzeuglängsachse
$\dot{\psi}$	$\frac{rad}{s}$	Gierrate

## Nomenklatur

Abkürzung	Bedeutung
ABS	<b>A</b> nti- <b>B</b> lockier- <b>S</b> ystem
ACC	<b>A</b> daptive <b>C</b> ruise <b>C</b> ontrol
ADAS	<b>A</b> dvanced <b>D</b> river <b>A</b> ssistance <b>S</b> ystem
AEB	<b>A</b> utomatic <b>E</b> mergency <b>B</b> raking
AG	<b>A</b> kutes <b>G</b> efahrenpotential
AFIL	<b>A</b> larm bei <b>F</b> ahrspurabweichung durch <b>I</b> nfrarot- <b>L</b> inienerkennung

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
BAS	<b>B</b> ahnführungs <b>a</b> ssistent
BLIS	<b>B</b> lind <b>S</b> pot <b>I</b> nformation <b>S</b> ystem
CAN	<b>C</b> ontroller <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
CAVE	<b>C</b> ave <b>A</b> utomatic <b>V</b> irtual <b>E</b> nvironment
CG	<b>C</b> enter of <b>G</b> ravity
CPU	<b>C</b> entral <b>P</b> rocessing <b>U</b> nit
DARPA	<b>D</b> efense <b>A</b> dvanced <b>R</b> esearch <b>P</b> rojects <b>A</b> gency
DLC	<b>D</b> istance to <b>L</b> ine <b>C</b> rossing
DLP	<b>D</b> igital <b>L</b> ight <b>P</b> rocessing
DLR	<b>D</b> eutsches Zentrum für <b>L</b> uft und <b>R</b> aumfahrt e. V.
EF	<b>E</b> ine <b>F</b> ahrspur
EPS	<b>E</b> lectrically <b>P</b> owered <b>S</b> teering
ESP	<b>E</b> lektronisches <b>S</b> tabilitäts- <b>P</b> rogramm
FAS	<b>F</b> ahrerassistenzsystem
FIS	<b>F</b> ahrerinformationssystem
FF	<b>F</b> orce <b>F</b> eedback
F&E	<b>F</b> orschung und <b>E</b> ntwicklung
GDR	<b>G</b> eringe <b>D</b> istanz- <b>R</b> eduzierung
GDZ	<b>G</b> eringe <b>D</b> istanz- <b>Z</b> unahme
GIDAS	<b>G</b> erman <b>I</b> n- <b>D</b> epth <b>A</b> ccident <b>S</b> tudy
HDR	<b>H</b> ohe <b>D</b> istanz- <b>R</b> eduzierung
HDZ	<b>H</b> ohe <b>D</b> istanz- <b>Z</b> unahme
HIL	<b>H</b> ardware oder <b>H</b> uman <b>I</b> n the <b>L</b> oop
HMI	<b>H</b> uman <b>M</b> achine <b>I</b> nterface
IPC	<b>I</b> nterprozess <b>k</b> ommunikation
IF	<b>I</b> dentische <b>F</b> ahrspur
KNN	<b>K</b> ünstliches <b>N</b> euronales <b>N</b> etz
KD	<b>K</b> onstante <b>D</b> istanz
KG	<b>K</b> ein <b>G</b> efahrenpotential
KR	<b>K</b> eine <b>R</b> elevanz
LCD	<b>L</b> iquid <b>C</b> rystal <b>D</b> isplay
LDW	<b>L</b> ane <b>D</b> eparture <b>W</b> arning
LED	<b>L</b> ight <b>E</b> mitting <b>D</b> iode
LG	<b>L</b> atentes <b>G</b> efahrenpotential
LKA	<b>L</b> ane <b>K</b> eeping <b>A</b> ssist
LKAS	<b>L</b> ane <b>K</b> eeping <b>A</b> ssist
MA	<b>M</b> ittlerer <b>A</b> bstand



---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
MG	<b>M</b> aximales <b>G</b> efahrenpotential
MMS	<b>M</b> ensch- <b>M</b> aschine- <b>S</b> chnittstelle
MKS	<b>M</b> ehr- <b>K</b> örper- <b>S</b> imulation
OEM	<b>O</b> riginal <b>E</b> quipment <b>M</b> anufacturer
SWG	<b>S</b> purwechsel <b>g</b> efahr
SVA	<b>S</b> purverlassens <b>a</b> ssistent
SWA	<b>S</b> purwechsel <b>a</b> ssistent
TLC	<b>T</b> ime to <b>L</b> ine <b>C</b> rossing
UDP	<b>U</b> ser <b>D</b> ata <b>P</b> rotocol
UG	<b>U</b> nmittelbares <b>G</b> efahrenpotential
UN	<b>U</b> nmittelbare <b>N</b> ähe
VR	<b>V</b> irtual <b>R</b> eality
WE	<b>W</b> eit <b>E</b> ntfernt
WOK	<b>W</b> urzel <b>o</b> rts <b>k</b> urve
ZF	<b>Z</b> wei <b>F</b> ahrspuren



---

## Motivation und Struktur der Arbeit

---

Im Folgenden wird eine Einführung in das behandelte Thema sowie die Motivation zur Durchführung der vorliegenden Arbeit dargestellt. Die Anfertigung dieser Arbeit liegt in der Vision einer unfallfreien Mobilität im Straßenverkehr begründet. Zukünftige Fahrerassistenzsysteme sind in der Lage, die Unfallzahlen und damit auch die Anzahl von Verletzten und Toten im Straßenverkehr zu reduzieren. Dies zeigt sich beispielsweise auch in der in Abbildung 1.1 gezeigten Unfallstatistik. Obwohl die Anzahl der motorisierten Verkehrsteilnehmer in Deutschland stetig steigt, sinkt die Anzahl an Verletzten und Getöteten im Straßenverkehr. Weiterhin steigt permanent das Bedürfnis der Gesellschaft nach zusätzlichem Fahrkomfort im Automobil. Im Rahmen dieser Arbeit soll dazu ein Beitrag geleistet werden. Dazu wird sowohl eine modellbasierte und experimentelle Methode zur effizienten Entwicklung von menschenzentrierten Fahrerassistenzsystemen als auch ein innovatives Querführungsassistenzsystem entwickelt und evaluiert. 15,5 % aller Unfälle auf deutschen Straßen mit Personenschaden erfolgen durch Abkommen von der Fahrbahn, wobei die Quote aller Unfälle mit Todesfolge sogar mit 33,7 % zu beziffern ist.<sup>1</sup> Hier soll das entwickelte System ganzheitlich unterstützen und die Unfallzahlen reduzieren.

---

<sup>1</sup>Statistisches Bundesamt

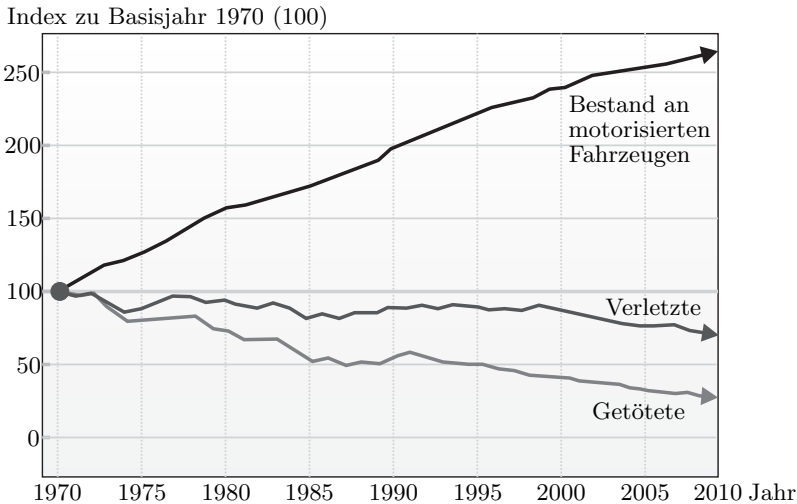


Abbildung 1.1: Fahrzeugbestand, Verletzte und Getötete im Straßenverkehr in Deutschland (Quelle: Statistisches Bundesamt)

Das entwickelte System kann, wie in Abbildung 1.2 gezeigt, nach [Thurner \(1998\)](#) den aktiven Fahrerassistenzsystemen zugeordnet werden.

Kürzere Entwicklungszeiten gehen mit der gleichzeitigen Forderung nach neuen Funktionen einher. Insbesondere muss bei Komfort- und Assistenzsystemen das Themenfeld Bedienerakzeptanz berücksichtigt werden. Die Zunahme der Systemkomplexität – speziell in Hinblick auf den späteren Bediener – macht intensive Tests zwingend erforderlich; die Zeit- und Entwicklungsbudgets sind jedoch stark beschränkt.

Komplexe Fragestellungen, wie etwa die Fahrerakzeptanz, können nicht ausschließlich durch reine Simulationen erfasst werden. Daher sind neue Entwicklungswerkzeuge erforderlich, welche die Lücke zwischen Simulation und realen Versuchen mit Prototypen schließen. Fahrsimulatoren sind hier ein optimales Werkzeug, um den Fahrer schon in der frühen Entwicklungsphase zu integrieren und neben der technischen Funktionalität auch das subjektive Empfinden zu testen. Verkehrssituationen, in denen der Fahrer häufig überfordert ist und Assistenzsysteme unterstützen können, lassen sich in der Regel nicht reproduzierbar und mit kontrollierten Bedingungen in der Realität erproben. Im Fahrsimulator können Verkehrsleitsysteme, Umgebungsverkehr sowie Wetterbedingungen vom Ver-

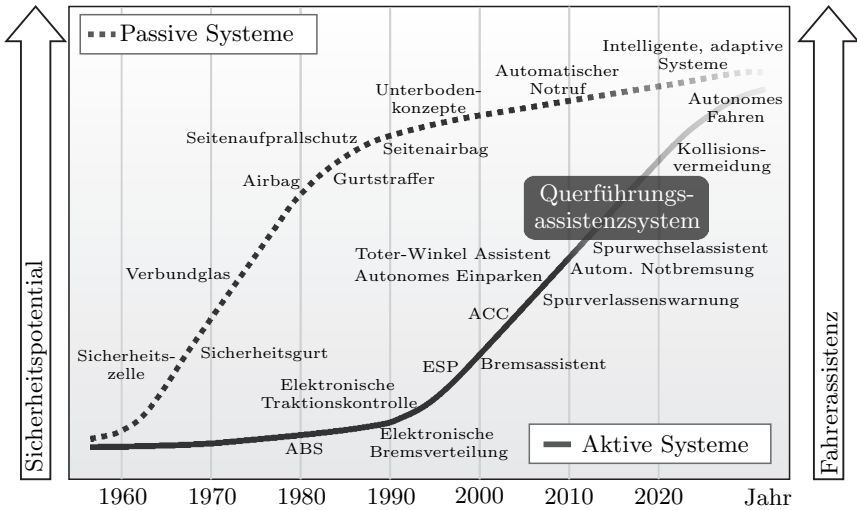


Abbildung 1.2: Potential passiver und aktiver Fahrerassistenzsysteme in Anlehnung an [Thurner \(1998\)](#)

suchsleiter beliebig gesteuert werden. Die Systemvorauslegung kann durch komplexe Modelle bereits mit einer hohen Qualität realisiert werden, so dass den Probanden im Fahrsimulator das System in einem sehr weit fortgeschrittenen Entwicklungsstadium präsentiert werden kann.

Die Arbeit gliedert sich in sechs Hauptkapitel. Nach der Einleitung folgt in Kapitel 2 der Stand der Technik und die für diese Arbeit relevanten Grundlagen im Hinblick auf Fahrerassistenzsysteme und die entsprechenden menschenzentrierten Entwicklungsprozesse. Insbesondere wird der Einsatz von Fahrsimulatoren zu diesem Zweck diskutiert. In Kapitel 3 wird die zur Anwendung kommende Fahrsimulatorarchitektur vorgestellt. Die modellbasierte Auslegung des entwickelten Querführungsassistenzsystems wird in Kapitel 4 behandelt. Hier werden die benötigten Algorithmen ausgelegt und implementiert. Die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle und die Verarbeitung der Algorithmen für die Kommunikation zum Fahrer werden in Kapitel 5 aufgezeigt. Abschließend wird in Kapitel 6 die experimentelle Fahrsimulatorstudie inklusive der daraus hervorgehenden Ergebnisse vorgestellt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und dem Ausblick für zukünftige Arbeiten.



## KAPITEL 2

---

# Grundlagen zu Fahrerassistenzsystemen und Fahrsimulatoren

---

Im folgenden Kapitel wird zunächst eine Übersicht der Entwicklungsmethoden für innovative Fahrerassistenzsysteme (FAS) dargestellt. Diese bilden die Basis für das im späteren Verlauf der Arbeit entwickelte Fahrerassistenzsystem für die Fahrzeugquerführung. Insbesondere wird die Anwendung von Fahrsimulatoren zu diesem Zweck diskutiert. Dazu werden aktuelle Fahrsimulatorkonzepte, die in Forschung und Entwicklung eingesetzt werden, vorgestellt. In dieser Arbeit wird ein komplexer Fahrsimulator angewendet, um den Fahrer zu einem frühen Systemreifestadium in den Entwicklungsprozess von FAS zu integrieren. Weiterhin wird ein Überblick der Entwicklungen aktueller, menschenzentrierter Fahrerassistenzsysteme gegeben, wobei hier der Fokus auf Komfortsysteme, die auf der Bahnführungsebene agieren, gelegt wird. Zusätzlich dazu werden die zur Realisierung der Assistenzsysteme notwendigen Sensoren kurz vorgestellt. Abschließend werden zwei Kategorien von FAS – Spurhalte- und Spurwechselassistenten – detaillierter beleuchtet, da diese die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systeme darstellen.

## 2.1 Entwicklungsmethodik und Bewertung von FAS

Bei der menschenzentrierten Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen müssen neben den technischen Anforderungen auch die menschlichen Eigenschaften und Umwelteinflüsse berücksichtigt werden. In Abbildung 2.1 wird dazu das Zusammenspiel von Fahrer, Fahrzeug und Umfeld mit einigen zu berücksichtigenden Details dargestellt.

Insbesondere die menschlichen Eigenschaften und Fähigkeiten sind von extrem vielen Faktoren abhängig und komplex zu ermitteln. Hier muss die – oftmals ausschließlich von Ingenieuren durchgeführte – Entwicklung von Fahrzeugsystemen durch die Kompetenzen von Sozialwissenschaftlern und Psychologen ergänzt werden.

Die Bandbreite der Fahrerassistenzsysteme reicht von einer einfachen Warnung bis hin zur kontinuierlichen Assistenz. Die für den Einsatz eines speziellen FAS-relevanten Komponenten müssen zu Beginn der Entwicklungsphase in geeigneter Weise definiert werden. Bei jeglicher Assistenz muss der Fahrer nach der international gültigen Wiener Konvention ([UN-Konferenz \(1968\)](#)) jederzeit in der Lage sein, die angebotene Assistenz zu überstimmen. Die Auslegung der Konvention

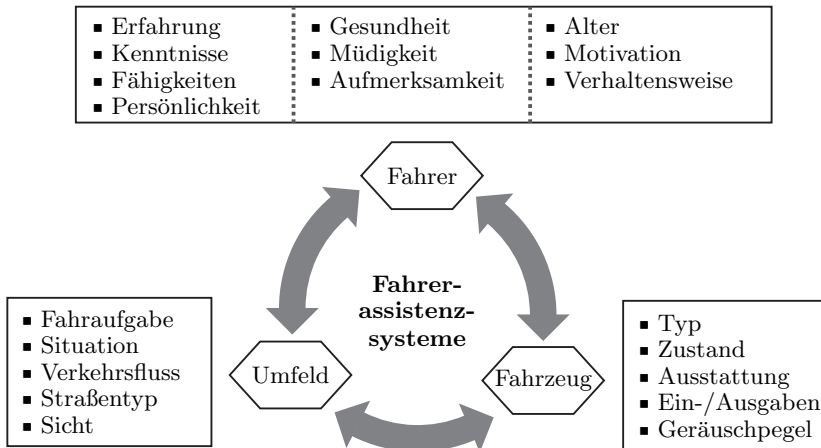


Abbildung 2.1: Zusammenspiel zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umfeld nach [König \(2009\)](#)



wird in Abhängigkeit des Anwendungsfalls jedoch mehr oder weniger unscharf interpretiert.

Kann es beispielsweise garantiert werden, dass ein Unfall nicht vermeidbar oder die Fahrgeschwindigkeit extrem niedrig ist, so werden auch autonome Eingriffe von FAS auf der Fahrzeugführungs- und Stabilisierungsebene zugelassen, die der menschliche Fahrer aufgrund seiner limitierten kognitiven und motorischen Fähigkeiten nicht überstimmen kann. Als Beispiele können hier das automatische Notbremsssystem von Volvo (*City Safety*), welches bis  $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  eine automatische Notbremsung mit Kollisionsvermeidung durchführt, sowie die „Automatische Notbremsung“ von Daimler (AEB: *Automatic Emergency Braking*) bis  $180 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  genannt werden.

Weiterhin ist die FAS-Entwicklung von Normen und Standards sowie Richtlinien geprägt. Neben der Einhaltung der verpflichtenden Normen werden in Richtlinien Werkzeuge zur systematischen Entwicklung von FAS definiert. Insbesondere sind die ISO-Normen ISO-17361 ([ISO17361](#) Spurverlassenswarnung) und ISO-17387 ([ISO17361](#) Spurwechselassistent) von besonderer Bedeutung. Weiterhin seien die Richtlinien für die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen (FIS) „European Statements of Principles on HMI“ (ESoP) [EU \(06.02.2007\)](#), die eine Expertenkommission verabschiedet hat, erwähnt. Die Richtlinien sollen freiwillig bei allen Beteiligten der Wertschöpfungskette von Fahrerinformationssystemen (FIS) und FAS Anwendung finden.

In diversen Kooperationsprojekten von OEMs<sup>1</sup>, Zulieferern, Hochschulen und staatlichen Institutionen, wie beispielsweise PROMETHEUS, DRIVE, MOTIV, INVENT, RESPONSE oder AKTIV, sind umfangreiche Ergebnisse bzw. Leitlinien für die Entwicklung von FAS entstanden. Hier seien exemplarisch die Fragebögen aus dem RESPONSE-Projekt (z. B. [Cotter u. a. \(2006\)](#), [Schwarz \(2006\)](#)) für die Bewertung von FAS sowie die FAS-Funktionsmatrix in Tabelle 2.1 erwähnt.

Darüber hinaus muss bewertet werden, inwiefern das System missbraucht werden kann. Wird z. B. die Hands-Off-Erkennung bei einem Bahnführungsassistenzsystem manipuliert, damit Sekundäraufgaben ausgeführt werden können, kann dies bei einem schlagartigen Systemausfall (z. B. durch fehlende Spurmarkierungen) zu einer kritischen Fahrsituation führen, da der Fahrer nicht in der Lage ist, die Fahraufgabe in angemessener Zeit wieder vollständig zu übernehmen.

---

<sup>1</sup>Original Equipment Manufacturer: Erstausrüster, in der Automobilindustrie Fahrzeughersteller.

Kategorie/ Details	Stabilität	Information	Warnung	Assistenz
Beispiel	ABS/ESP	Navigations- system	Spurverlas- senswarnung	Spurführungs- assistent
Fokus	Fahrzeug- stabilität	Fahrerin- formation	Fahrer- warnung	Aspekte der Längs- und Querführung
Fahrer- kontroll- aufgabe	Keine	Voll- ständig	Indiffe- rent	Übersteuer- barkeit stets gewährleistet
Sicherheit	Technisch	Ablenkung, Überwachung	Verständ- nis	Kontrollier- barkeit
Typische MMS	Keins, Schalter	Bildschirm, Audio	Buzzer, Symbol	Schalter, Dis- plays, Vorhan- dene Bedien- elemente

Tabelle 2.1: FAS-Funktionsmatrix aus dem RESPONSE-Projekt nach  
Cotter u. a. (2006)

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein integrales FAS zur Bahnführungs- und Spurwechselassistentz aus den Kategorien WARNUNG und ASSISTENZ vorgestellt. Der Entwicklungsprozess kann anwendungsspezifisch sehr unterschiedlich gestaltet sein. In Abbildung 2.2 wird die grundsätzliche Methode der Entwicklung eines FAS, so wie es im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wird, dargestellt. Zu Beginn des Entwicklungsprozesses müssen die Systemanforderungen und -funktionen definiert werden. Hier werden bereits die benötigte Sensorik, Aktorik und die MMS definiert.

Im zweiten Schritt wird ein mathematisches Modell des Gesamtsystems implementiert. Die dazu verwendeten Modelle müssen ausreichend komplex sein, um das Gesamtsystem Fahrer, Fahrzeug und Umfeld zu beschreiben. Für die Basisauslegung einiger FAS-Regler kann es jedoch sinnvoll sein, ein lineares Gesamtmodell zu implementieren, um auf die klassischen Methoden der Regelungstechnik zurückgreifen zu können.

Ist das grundlegende Systemverhalten dann durch Simulationen abgesichert, wird im nächsten Entwicklungsschritt der Mensch in den Entwicklungsprozess inte-

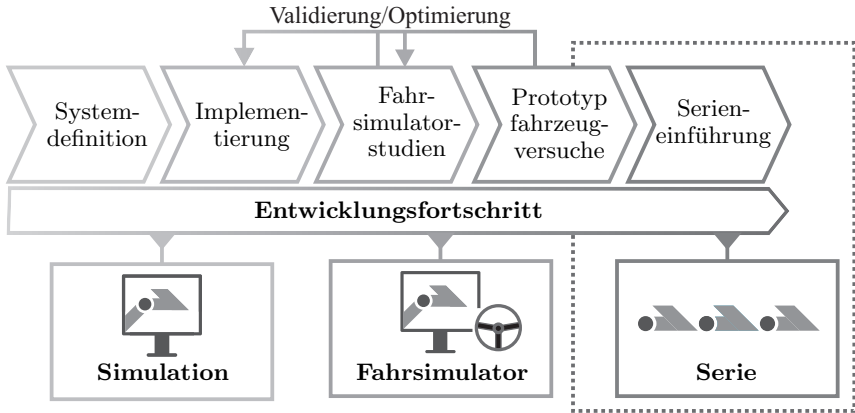


Abbildung 2.2: Im Rahmen dieser Arbeit angewendetes Entwicklungskonzept von Fahrerassistenzsystemen mit einem Fahrsimulator

griert. Durch den Einsatz von Fahrsimulatoren kann dies bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt realisiert werden. In einer Laborumgebung können reproduzierbare, sichere und kostengünstige Versuche durchgeführt werden, bei denen die relevanten Messdaten aufgezeichnet werden können. In Vorversuchen (*Pre-test*) werden zunächst Experten als Probanden eingesetzt, die das Systemverhalten auf Basis ihrer Entwicklungserfahrung bewerten. Erst in einem späteren Iterationsschritt werden dann Probanden eingesetzt, die sowohl bezüglich der Anzahl als auch der Altersverteilung eine repräsentative Stichprobe für die angestrebte Zielgruppe im Absatzmarkt darstellen. Dies ist besonders wichtig, da beispielsweise die Kundenakzeptanz vom subjektiven Empfinden und vom Systemverständnis abhängt. Die Auswertung der Studien bildet die Basis für den iterativen Validierungs- und Optimierungsschritt. Wenn das System einen definierten Reifegrad erreicht hat, werden parallel zu den Fahrsimulatorstudien erste Prototypfahrversuche durchgeführt. Um die Ergebnisse auch für die weiteren Optimierungen im Fahrsimulator nutzen zu können, ist es wichtig, dass das Gesamtfahrsimulatormodell inklusive des FAS möglichst genau das reale Systemverhalten wiedergibt. Eine umfassende Übersicht von Modellen unterschiedlicher Komplexität wird in [Schramm u. a. \(2010a\)](#) vorgestellt. Der letzte Entwicklungsschritt sollte im Optimalfall die Serieneinführung des FAS in möglichst vielen Fahrzeugmodellen sein. Im Rahmen dieser Arbeit werden insbesondere der Aufbau von Simulationsmodellen sowie die FAS-Validierung im Fahrsimulator (Entwicklungsschritte zwei und drei) behandelt.

### 2.1.1 Definition von Assistenz und MMS

Bei der Auslegung und Auswahl der Interaktionskanäle kann beispielsweise auf Basis von [Hoffmann und Gayko \(2009\)](#) auf die in Tabelle 2.2 aufgeführten Kriterien zurückgegriffen werden. Der Informationsgehalt beschreibt die Größe der Information, die Verzeihlichkeit steht stellvertretend für die Auswirkung einer Fehlwarnung. Die Abdeckungsrate bestimmt die Verfügbarkeit eines Sinneskanals vom FAS, bzw. die Möglichkeit noch zu reagieren und die Assistenz zu interpretieren. Die für die FAS-Realisierung verfügbaren Interaktionskanäle bzw. MMS werden in Abschnitt 2.3.1 detaillierter beleuchtet. Wenn ein Fahrerassistenzsystem aktiv in das Fahrgeschehen eingreift, wie beispielsweise ein Spurhalteassistent mit kontinuierlicher Spurführung, ändert dies die gewohnte Fahraufgabe drastisch. Dies hat zur Folge, dass der Fahrer sein Fahrzeug neu kennenlernen und zunächst Vertrauen zu dem System aufbauen muss. Der Fahrer muss sich ein inneres Modell bzw. eine Wissensbasis bezüglich des FAS-Verhaltens in verschiedenen Fahrsituationen aufbauen. Im besten Fall wird ein Teil der Fahraufgabe an das FAS delegiert, was eine Verminderung der mentalen Last sowie eine Erhöhung der Fahrsicherheit zur Folge hat. Dies funktioniert nur, wenn der Fahrer nicht durch das FAS überlastet wird. Die Entlastung und Belastung des Fahrers durch das FAS wird beispielsweise in [König u. a. \(2003\)](#) dargelegt.

Es existiert eine Vielzahl von Gründen, welche die Funktion des FAS derart beeinflussen, dass der Fahrer schlagartig wieder die gesamte Fahraufgabe übernehmen muss. Für einen Spurhalteassistenten kann beispielsweise keine Funktion mehr garantiert werden, wenn die Qualität der Fahrbahnrandmarkierungen derart schlecht ist, dass das Kamerasystem diese nicht mehr erkennen kann. Die Gestaltung der Systemabschaltung und insbesondere die Information des Fahrers über den Systemzustand sind daher sehr wichtig.

Informationsgehalt	Verzeihlichkeit	Abdeckungsrate
aufmerksamkeits- erregend	sehr verzeihlich	hoch
hinweisend auf die Situation	verzeihlich	mittel
hinweisend auf die Aktion	weniger verzeihlich	niedrig

Tabelle 2.2: Kriterien für die Einteilung von Warnelementen nach [Hoffmann und Gayko \(2009\)](#)

Dabei ist der Zeitpunkt der Warnung von entscheidender Bedeutung. Die Warnung bzw. die Assistenz muss so früh ausgegeben werden, dass der Fahrer in der Lage ist, diese in geeigneter Weise zu verarbeiten. Je früher die Warnung ausgegeben wird, desto wahrscheinlicher ist jedoch auch das Auftreten einer Fehlwarnung, da insbesondere der Situationsverlauf nicht deterministisch ist. Wird die Assistenz jedoch zu spät ausgegeben bzw. bereitgestellt, so kann es passieren, dass der Fahrer aufgrund seiner beschränkten mentalen Verarbeitungsgeschwindigkeit und physischer Limitierungen nicht mehr in der Lage ist, schnell genug zu reagieren.

Es ist von essentieller Bedeutung, den Warnzeitpunkt und die Art der Assistenz bzw. den Sinneskanal, der angesprochen wird, in geeigneter Weise zu gestalten. Ziel sollte es sein, die Assistenz bzw. Warnung mit einer großen Abdeckungsrate, möglichst spät und effektiv mit einer hohen Verzeihlichkeit auszulegen. Passiert eine Fehlwarnung zu häufig, so wird der Fahrer das System deaktivieren. In Abbildung 2.3 wird das grundlegende Design-Portfolio für die Auslegung einer fiktiven Assistenz beispielhaft dargestellt. Die ausgefüllten Kreise stehen symbolisch für eine Eignung der Assistenz.

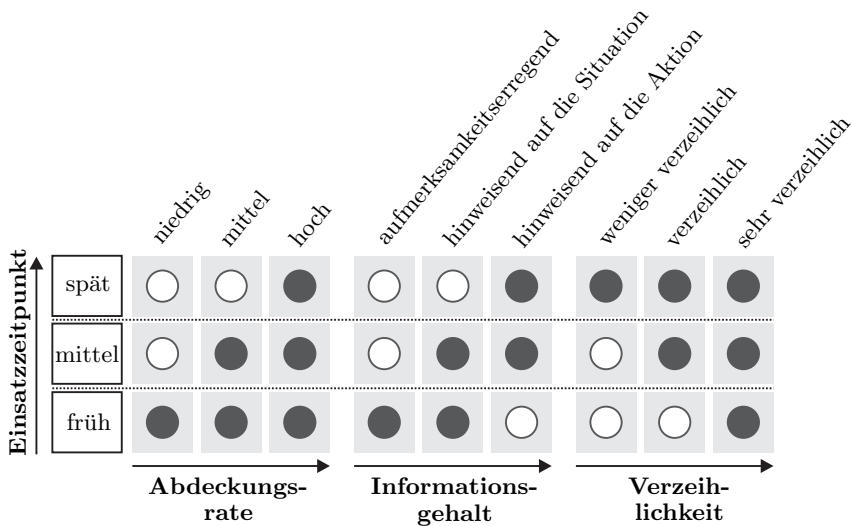


Abbildung 2.3: Portfolio-Diagramm (ausgefüllter Kreis: geeignet) nach Hoffmann und Gayko (2009)

Die Entwicklung von FAS ist eine interdisziplinäre Aufgabe, so dass im Entwicklungsprozess viele verschiedene Entwickler das FAS auf Basis der Systemanforderungen bewerten. Das in Abbildung 2.3 dargestellte Verfahren ist eine Möglichkeit, das Assistenzkonzept einzugrenzen. Das Resultat bildet dann im nächsten Entwicklungsschritt die Basis für erste Konzeptstudien. Dies ist der früheste Zeitpunkt, um den Menschen im Entwicklungsprozess zu integrieren. Zur Realisierung bietet sich der Einsatz von Fahrsimulatoren, wie beispielsweise in Abschnitt 2.2 oder Kapitel 3 beschrieben, an. Im Rahmen dieser Arbeit wird insbesondere der Entwicklungsschritt im Fahrsimulator fokussiert. Im Wesentlichen ergeben sich nach König (2009) die in Tabelle 2.3 vorgestellten Instrumente.

Die ausschließliche Entwicklung eines FAS im Fahrsimulator ist derzeit und wohl auch in naher Zukunft nicht realisierbar. Je nachdem, welches FAS entwickelt werden soll, kann der Fahrsimulator jedoch für den jeweiligen Entwicklungsfall ausgewählt bzw. adaptiert werden. Dazu gehören beispielsweise die Visualisierung, das Bewegungssystem sowie die Ausgestaltung der benötigten MMS. Neben den im Fahrsimulator relativ problemlos messbaren physikalischen und naturwissenschaftlichen Größen des Fahrzeugs werden im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls sozialwissenschaftliche Aspekte durch eine qualitative und quantitative Auswertung eines Fragebogens fokussiert. Die Auswertung der physiologischen Auswirkungen auf den Menschen in einer Fahrsimulatorstudie kann beispielsweise Hesse (2011) entnommen werden.

Beobachtung	Physiologische Messungen	Befragung
<b>Fahrzeugtechnik</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Längsdynamik</li> <li>■ Querdynamik</li> <li>...</li> </ul> <b>Menschl. Verhalten</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Motorik</li> <li>■ Blickverhalten</li> <li>...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Herzfrequenz</li> <li>■ Muskelspannung</li> <li>■ Hautleitwert</li> <li>■ Lidschlagfrequenz</li> <li>...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Meinung</li> <li>■ Subjek. Bewertung</li> <li>■ Persönlichkeit</li> <li>■ Systemverständnis</li> <li>...</li> </ul>

Tabelle 2.3: Kriterien für die Einteilung von Warnelementen nach Hoffmann und Gayko (2009)

## 2.2 Fahr simulatoren in Forschung und Entwicklung

Fahr simulatoren werden zunehmend in Forschung und Entwicklung eingesetzt. Aufgrund der stetig steigenden CPU-Rechenleistung können immer komplexere Fahrzeug- und Umgebungsmodelle in Echtzeit berechnet werden. Auch die Visualisierung der virtuellen Realität wird immer besser, so dass der Immersionsgrad stetig steigt. Der Einsatz von 3D-Visualisierungskonzepten nimmt ebenfalls stetig zu.

Je nach Einsatzgebiet können unterschiedlichste Anforderungen an den Simulator gestellt werden. Soll beispielsweise ein FAS untersucht werden, das als MMS den kinästhetischen Sinn über einen Bremsruck ansprechen soll, so ist das Bewegungssystem des Simulators besonders wichtig. Soll aber beispielsweise ein Bahnführungsassistent für den Komfortbereich untersucht werden, der ein Überlagerungsmoment im Lenkrad als MMS anspricht, so ist die Synthese des Lenkmomentes bzw. die Qualität des Lenkungsaktors von besonderer Bedeutung. Mit zunehmender Komplexität – insbesondere des Bewegungssystems – steigen die Kosten für die Realisierung des Fahr simulators überproportional zu dem generierten Mehrnutzen, so dass der optimale Fahr simulator nur für den individuellen Anwendungsfall definiert werden kann. Fahr simulatoren können keine realen Fahrversuche ersetzen, sie ermöglichen jedoch die Reduzierung der Entwicklungszeit und -kosten für FAS.

Aufgrund der hohen Anwendungs- und Anforderungsbandbreite ist es schwierig, Fahr simulatoren einheitlich zu klassifizieren. In Tabelle 2.4 wird eine Übersicht der für einen Fahr simulator, der in Forschung und Entwicklung eingesetzt werden soll, wesentlichen Elemente vorgestellt. Die Qualität und der Umfang der Simulation bilden die Basis für das Konzept. Da interaktive Fahrversuche mit menschlichen Probanden angestrebt werden, ist die Ausgestaltung des Fahrerarbeitsplatzes von besonderer Bedeutung. Der realisierte Immersionsgrad wird im Wesentlichen durch die Visualisierung, den Ton und gegebenenfalls durch das Bewegungssystem bestimmt. Die wesentlichen Vorteile für den Einsatz von Fahr simulatoren im Entwicklungsprozess von menschenzentrierten FAS ergeben sich nach Breuer (2009) aus der

- exakten Parametrier- und Reproduzierbarkeit der zu untersuchenden Szenarien,
- Einsetzbarkeit in der frühen Entwicklungsphase,

Simulation	Fahrerarbeitsplatz	Visualisierung/ Sound	Bewegungssystem
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fahrdynamik</li> <li>■ FAS</li> <li>■ Verkehr</li> <li>■ Fußgänger</li> <li>■ Fahrbahn</li> <li>■ Umfeld</li> <li>■ Wetter</li> <li>■ Events</li> <li>...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Ergonomie</li> <li>■ Sicherheit</li> <li>■ Cockpit</li> <li>■ Anzeigen</li> <li>■ Eingabegeräte</li> <li>■ MMS</li> <li>■ FIS</li> <li>■ HIL-Elemente</li> <li>...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Technologie</li> <li>■ Kanäle 2/3D</li> <li>■ Blickfeld</li> <li>...</li> <li>■ Soundkanäle</li> <li>■ 3D-Sound</li> <li>■ Dopplereffekt</li> <li>...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Freiheitsgrade</li> <li>■ Vibrationen</li> <li>■ Beschleunig.</li> <li>■ Geschwindigk.</li> <li>■ Rotation</li> <li>■ Sensorik</li> <li>■ Aktorik</li> <li>■ Kinetose</li> <li>...</li> </ul>

Tabelle 2.4: Strukturierung der Elemente von F&amp;E-Fahrsimulatoren

- hohen Variationsmöglichkeit bezüglich der Umgebungsbedingungen und Systemparameter und
- gefahrlosen Darstellung kritischer Fahrsituationen.

Dementgegen bestehen nach [Breuer \(2009\)](#) die Nachteile insbesondere in

- dem veränderten menschlichen Fahrverhalten,
- dem eingeschränkten Gefährdungsbewusstsein,
- den wahrnehmungsphysiologischen Einschränkungen (Bild- und Bewegungssystem),
- der oftmals unzureichenden Modellqualität,
- dem hohen Soft- und Hardwareaufwand und
- dem Auftreten der Simulatorekrankheit (Kinetose nach [Schlender \(2008\)](#)) und dem damit verbundenen Probandenausfall.

Im Folgenden wird ein Überblick einiger hochentwickelter Fahrsimulatoren vorgestellt, die bei OEMs und Forschungseinrichtungen für die Entwicklung von FAS eingesetzt werden.



### 2.2.1 Auszug aktueller Fahr simulatoren in der Forschung

Fahr simulatoren werden zunehmend in verschiedenen Einsatzgebieten verwendet. Dabei reicht die Verwendung von einfachen Spielsimulationen bis hin zu wissenschaftlichen Probandenstudien innovativer Fahrzeugsysteme. Die Anwendungsfelder für Fahr simulatoren sind vielfältig. Neben dem Einsatz in Forschung und Entwicklung können Simulatoren in der Ausbildung von Fahr schülern oder zur Demonstration innovativer Systeme auf Messen oder Kundenpräsentationen genutzt werden. Die Anforderungen an den Simulator können in Abhängigkeit vom Anwendungsfall sehr unterschiedlich sein. Während in der Entwicklung sehr komplexe Modelle und oftmals HIL-Simulationen mit Taktraten im Millisekundenbereich eingesetzt werden, liegt für Kundenpräsentationen der Fokus oftmals auf sehr detaillierten Visualisierungen. Im Bereich der Forschung und Entwicklung existieren diverse Fahr simulator-Varianten. Im Folgenden werden einige der aufwendigsten Simulatoren vorgestellt, um zu zeigen, welche Funktionalität zum aktuellen Stand der Technik derzeit realisierbar ist.

#### BMW-Simulator

Der in Abbildung 2.4 gezeigte BMW-Simulator wurde 2003 fertiggestellt und besteht aus einem Dom, der auf ein Hexapod montiert ist und die Möglichkeit bietet, ein Fahrzeug-Mockup im Inneren zu positionieren. Sowohl Längs- und Querschleunigung als auch Straßenunebenheiten können durch das Bewegungssystem dargestellt werden. Das Lenkrad verfügt über eine Force-Feedback-Funktion. Die Simulation des Komplettfahrzeugs erfolgt mit einer Taktrate von 180 Hz und ist in MATLAB/Simulink realisiert, so dass sowohl neue Fahrzeugmodelle als auch zu entwickelnde FAS schnell integriert werden können. Das Bewegungssystem verfügt über sechs Freiheitsgrade und ist mit einer Hexapod-Plattform realisiert. Das zu testende Mockup kann variiert werden, während die für die Visualisierung benötigten Projektoren stationär montiert sind. Das Bild für die Frontvisualisierung wird auf eine Rundleinwand mit einem Radius von 3,5 m und einer Höhe von 4 m projiziert. Es ergibt sich ein horizontaler Blickwinkel von 180 Grad und ein vertikaler Blickwinkel von 35 Grad. Die Bildwiederholffrequenz beträgt 60 Hz. Weiterhin sind zwei rechteckige Leinwände hinter dem Mockup positioniert. Insgesamt werden fünf DLP-Projektoren mit einer Auflösung von jeweils 1920 x 1080 Pixeln verwendet. Ein 34 Zoll-LCD wird darüber hinaus hinter dem Fahrzeug positioniert, um das Bild für den Innenspiegel darzustellen. Der Fahrer



Abbildung 2.4: BMW-Fahrsimulator in München (siehe dazu Strobl (2003))

kann durch die Originalseitenspiegel die Rückprojektion betrachten. Die Audio-simulation umfasst das Ego-Fahrzeug, den Umgebungsverkehr, Reifen-, Wind- und Motorgeräusche, die mit neun Lautsprechern in 3D generiert werden. Die Lautsprecher sind sowohl innerhalb als auch außerhalb des Fahrzeugs installiert. Der Simulator wird bei BMW unter anderem für die Entwicklung innovativer FAS eingesetzt.

### DLR-Simulator

Der in Abbildung 2.5 gezeigte dynamische DLR-Fahrsimulator steht in Braunschweig und verfügt nach Pattberg (2005) und Stöbe (2006) über ein Bewegungssystem, das mit einem hydraulischen Hexapod-System realisiert ist, bei dem die fahrzeugtragende Kabine unterhalb der oberen Gelenke aufgehängt ist. Diese Art der Konstruktion ermöglicht vergleichsweise große translatorische und rotatorische Bewegungen. In Tabelle 2.5 werden der Arbeitsraum und die Dynamik des Simulators für die sechs Bewegungsfreiheitsgrade zusammengefasst. Die Freiheitsgrade sind unabhängig voneinander steuerbar. Der Simulator hat eine Nutzlast von ca. 1,3 Tonnen. Dies reicht aus, um beispielsweise einen kompletten VW Golf V mit der Kabine zu bewegen. Die Bewegungssimulation der Fahrzeugbeschleunigungen wird durch ein intelligentes *Motion-Cueing* realisiert. Die Umwelt und der Straßenverkehr werden in einem Blickfeld von 270 Grad horizontal und 40 Grad vertikal für die Fahrzeugfront und -seiten visualisiert. Insgesamt werden über eine neunkanalige Rückprojektion 9200 x 1280 Pixel projiziert. Weiterhin sind LCDs für die Spiegelansichten montiert, um auch den rückwärtigen Verkehr beobachten zu können. Die Fahrdynamik wird mit der kommerziellen



Abbildung 2.5: Dynamischer DLR-Fahrsimulator in Braunschweig nach Stöbe (2006)

	Weg	Geschwindigkeit	Beschleunigung
<b>Längs</b>	$\pm 1,5 \text{ m}$	$\pm 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
<b>Quer</b>	$\pm 1,4 \text{ m}$	$\pm 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
<b>Vertikal</b>	$\pm 1,4 \text{ m}$	$\pm 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
<b>Rollen</b>	$-20 \text{ deg} / +21 \text{ deg}$	$\pm 50 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$	$\pm 250 \frac{\text{deg}}{\text{s}^2}$
<b>Nicken</b>	$\pm 21 \text{ deg}$	$\pm 50 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$	$\pm 250 \frac{\text{deg}}{\text{s}^2}$
<b>Wanken</b>	$\pm 21 \text{ deg}$	$\pm 50 \frac{\text{deg}}{\text{s}}$	$\pm 250 \frac{\text{deg}}{\text{s}^2}$

Tabelle 2.5: Arbeitsraum und Dynamik des DLR-Simulators nach Stöbe (2006)

Software CARSIM simuliert. Darüber hinaus erfahren die Probanden während der virtuellen Fahrt 3D-Sound inklusive Dopplereffekt. Der Simulator wird nach Stöbe (2006) für die Untersuchung des Fahrverhaltens mit und ohne Fahrerassistenzsysteme eingesetzt. Ziel ist es, in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium eine Vorauslegung der zu entwickelnden FAS durchzuführen.

### Daimler-Simulator

Der in Abbildung 2.6 gezeigte dynamische Daimler-Fahrsimulator wurde am 11. Oktober 2010 bei der Daimler AG in Sindelfingen vorgestellt. Das Bewegungssystem ist über einen Dom, der auf einem Hexapod mit sechs beweglichen Stützen montiert ist, realisiert. Das Gesamtsystem kann auf einer 12 Meter langen Schie-

ne für die Simulation der Querdynamik bewegt werden. Aufgrund der Verwendung elektrischer Aktoren ist die Systemdynamik im Vergleich zu hydraulischen Aktoren höher. Die Aktoren können im gebremsten Betrieb Energie in das Stromnetz reкупerieren. Der Simulator hat eine Maximalgeschwindigkeit von  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , die Quergeschwindigkeit auf der Schiene beträgt maximal  $12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

In dem Dom befindet sich ein Komplettfahrzeug, und die Visualisierung erfolgt mit einer 360 Grad-Rundleinwand. Es werden Straßenverkehr, Fußgänger, Häuser und Vegetation interaktiv visualisiert. Die Echtzeitsimulation der Fahrdynamik und die Steuersignale für das Bewegungssystem erfolgen mit einer Taktzeit von 1 ms. Daimler testet in diesem Simulator Systeme und Komponenten zukünftiger Mercedes-Baureihen in allen Entwicklungsphasen. Dazu werden beispielsweise auch Probandenstudien in einem sicheren Umfeld durchgeführt.



(a) Mechanische Grundkonstruktion des Daimler-Simulators      (b) 360 Grad-Visualisierung im Daimler Simulator

Abbildung 2.6: Daimler-Simulator in MB Technology Center, Sindelfingen (Quelle: Daimler AG)

### Toyota-Simulator

Der in Abbildung 2.7 vorgestellte dynamische Toyota-Fahrsimulator steht im Higashifuji Technical Center in Japan. Er verfügt über insgesamt 13 Freiheitsgrade zur Bewegung des – in einem Dom montierten – Komplettfahrzeugs. Der 4,5 m hohe und 7,5 m breite Dom ist auf einem Hexapod montiert, der wiederum auf einem zweiachsigen Schienensystem montiert ist.

Das Schienensystem ermöglicht translatorische Bewegungen in der Ebene von  $25 \times 35 \text{ m}$  mit einer Geschwindigkeit von  $6,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und einer Beschleunigung von

$0,5 \frac{m}{s^2}$ . Der maximale Neigungswinkel des Doms liegt bei 25 Grad, der Gierwinkel ist durch die im Dom montierte 360 Grad-Drehscheibe unbegrenzt. Zusätzlich sind an allen vier Radnaben Vibrationssysteme für die vertikale Anregung und die Simulation der Fahrbahnnunebenheiten installiert.

Im Cockpit sind alle Fahrerbedien- und informationselemente wie gewohnt für den Fahrer verfügbar.

Die in Abbildung 2.7(b) gezeigte 360 Grad-Rundprojektion ermöglicht die Visualisierung der virtuellen Welt, bestehend aus der Umgebung, dem Verkehr und den Fußgängern. Der Fahrerkopf befindet sich im Zentrum des Doms, dies ermöglicht eine einfache Synchronisierung der Visualisierung mit der Drehscheibenbewegung. Insgesamt werden dazu acht Projektoren verwendet. Vervollständigt wird das System durch die 3D-Audiosimulation.

Der Simulator wird von Toyota sowohl für die Erprobung neuer Fahrerassistenzsysteme als auch für die Verkehrs- und Straßenplanung eingesetzt.



(a) Mechanischer Aufbau des Toyota-Simulators



(b) 360 Grad-Visualisierung im Toyota-Simulator

Abbildung 2.7: Toyota-Simulator im Higashifuji Technical Center, Japan (Quelle: Toyota)

## 2.3 Grundlagen menschenzentrierter Fahrerassistenzsysteme

Als Fahrerassistenzsysteme werden schon seit Anfang der achtziger Jahre technische Systeme bezeichnet, die den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen. In der klassischen Begriffsdefinition nach Duden (2002) erhält der „Fahrer, der ein Kraftfahrzeug fährt, Beistand bzw. Mithilfe von einem technischen System“. Dieses technische System wird als „Gesamtheit von Objekten, die sich in einem

ganzheitlichen Zusammenhang befinden und durch die Wechselwirkung zueinander gegen ihre Umwelt abzugrenzen sind“ definiert. So kann beispielsweise auch ein elektrischer Starter zunächst als Fahrerassistenzsystem bezeichnet werden.

Durch die schnell voranschreitende Entwicklung von Sensorik, Aktorik und Mikrocontrollern haben sich die FAS extrem weiterentwickelt. In aktuellen FAS-Forschungsprojekten werden die Systeme zunehmend durch den Automatisierungsgrad bzw. die Formen der Arbeitsteilung zwischen Automat (Fahrzeug) und Fahrer klassifiziert.

Diese Arbeitsteilung kann nach [Kraiss \(1998\)](#) in drei Kategorien unterteilt werden. In der seriellen Arbeitsteilung werden die Aufgaben nacheinander von Mensch und Automatik ausgeführt, bei der parallelen Form werden verschiedene Aufgaben gleichzeitig ausgeführt. Bei der als „Assistenzfunktion“ bezeichneten Form werden die Aufgaben redundant-parallel – also in Kooperation zwischen Mensch und Maschine – ausgeführt.

Als Assistenzsystem kann demnach ein technisches System bezeichnet werden, das in Kooperation mit dem Fahrer die Fahraufgabe bewältigt, wobei das Assistenzsystem hauptsächlich zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit und des Fahrkomforts eingesetzt wird. Nach [Kopf \(2005\)](#) führt dies zu einer Parallelstruktur zwischen Mensch und Maschine.

### **2.3.1 Mensch-Maschine-Schnittstelle/Human-Machine-Interface**

Der Mensch nimmt die relevanten Informationen in seiner Umgebung mit seinen Sinnesorganen wahr. Auf Basis seiner Wissensdatenbank und der kognitiven Verarbeitung dieser Informationen resultiert dann die aktuelle Fahrsituation, welche die Basis für das menschliche Handeln bildet. Das Fahrzeug nutzt diverse Sensoren, um die aktuelle Fahrdynamik, das Umfeld und den Interaktionsgrad mit dem Menschen zu messen.

Oftmals wird auch der Begriff maschinelles Sehen von Kraftfahrzeugen verwendet. Die in [Abbildung 2.8](#) zusammenfassend dargestellte Umfeldsensorik ist für viele FAS die zentrale Systemkomponente. Durch Sensorfusion können die Stärken verschiedener Sensoren kombiniert und somit die Messgüte verbessert werden. Eine Übersicht der Sensorik wird beispielsweise in [Reif \(2010\)](#), [Stiller u. a. \(2009\)](#) oder [Winner u. a. \(2009b\)](#) gegeben.

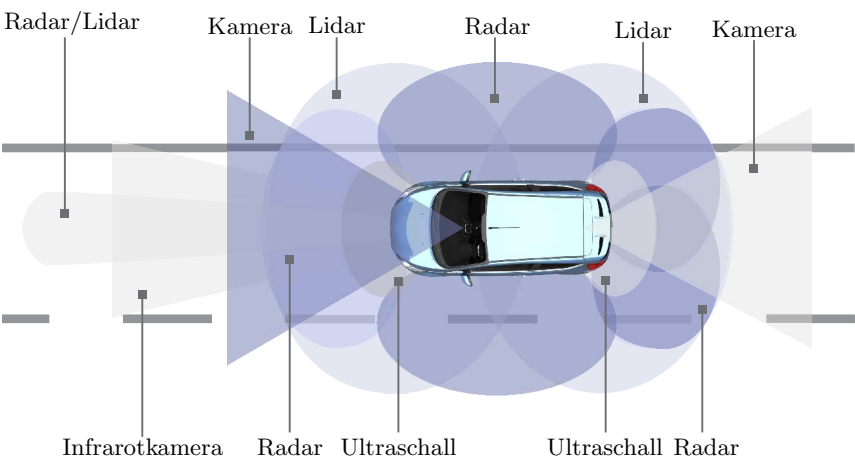


Abbildung 2.8: Sensoren für das maschinelle Sehen von Fahrzeugen im Einsatz für FAS

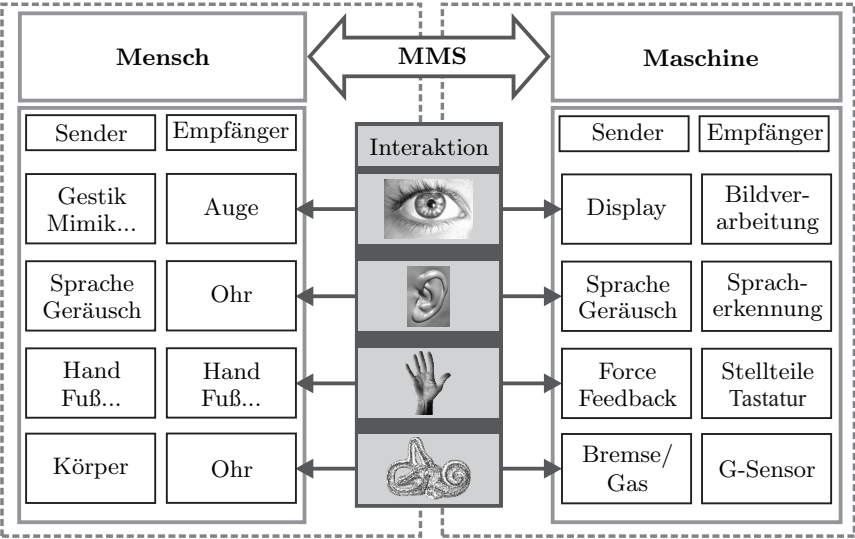


Abbildung 2.9: Interaktionskanäle zwischen Mensch und Maschine

Fahrer und Fahrzeug kommunizieren und interagieren über die in Abbildung 2.9 vorgestellte Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS). Im englischsprachigen Raum wird diese oftmals als *Human-Machine-Interface (HMI)* bezeichnet. Die in Abbildung 2.9 nicht aufgeführten, verbleibenden Sinneskanäle – der olfaktorische<sup>2</sup> und der gustatorische<sup>3</sup> Kanal – haben für die Nutzung bei FAS nur eine untergeordnete Relevanz. Die physikalischen Eigenschaften der Sinneskanäle können beispielsweise [Abendroth und Bruder \(2009\)](#) entnommen werden.

Im Gegensatz zum Menschen hat das technische System keine begrenzte Aufmerksamkeit und wird auch nicht durch Sekundäraufgaben, wie z. B. durch die Bedienung des Infotainment-Systems, abgelenkt. Die Auswahl einer geeigneten Assistenz bzw. die Gestaltung einer Warnung hängt nach [Hoffmann und Gayko \(2009\)](#) zum einen von der Wirksamkeit der Warnung oder Assistenz bei einer vorhandenen Gefahr, zum anderen von den Auswirkungen einer Fehlauflösung ab.

Modelle zur Beschreibung der menschlichen Informationsverarbeitung können beispielsweise [Wickens \(1984\)](#), [Johanssen \(1993\)](#) oder [Jürgensohn und Timpke \(2001\)](#) entnommen werden. Nach [Hoffmann und Gayko \(2009\)](#) leiten sich zwei Zielsetzungen für warnende Fahrerassistenzsysteme ab. Der Mensch soll einerseits bei der Verteilung seiner – nur begrenzt verfügbaren – Aufmerksamkeitsressourcen unterstützt werden, um dann in einer Gefahrensituation durch schnelle Wahrnehmung die Gefahr abwenden. Andererseits soll die Art der Warnung bzw. der Assistenz den Fahrer bei seiner Entscheidung und Antwortauswahl positiv unterstützen.

Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine muss situationsabhängig angepasst werden. Bei der Definition geeigneter Mensch-Maschine-Schnittstellen sollten einige grundlegende Eigenschaften bezüglich der menschlichen Informationsverarbeitung berücksichtigt werden. Insbesondere ist zu beachten, wie hoch die Komplexität der zu übermittelnden Information ist und wie schnell diese übermittelt werden muss. In Tabelle 2.6 werden sowohl Informationsrate als auch die entsprechende Wahrnehmungszeit der verschiedenen Interaktionskanäle unter optimalen Bedingungen qualitativ kategorisiert. Nach [Huang \(2003\)](#) werden etwa 90 % der für die Fahraufgabe relevanten Informationen über den visuellen Interaktionskanal aufgenommen. Der haptische Kanal hat hingegen Vorteile im Hinblick auf die Reaktionszeiten. Der akustische Kanal dient zur Interaktion mit Sprache (Ein-/Ausgabe) und Geräuschen bzw. Warntönen. Die für die

---

<sup>2</sup>Geruchssinn.

<sup>3</sup>Geschmackssinn.



Sinneskanal	Alternative Namensgebung	Informationsrate	Wahrnehmungszeit
Visueller Kanal	Sehsinn	sehr hoch	schnell
Auditiver Kanal	Hörsinn	mittel	mittel
Taktiler Kanal	Tastsinn	niedrig	sehr schnell
Kinästhetisch, vestibulärer Kanal	Stellungs- und Bewegungssinn	niedrig	sehr schnell

Tabelle 2.6: Qualitative Bewertung ausgewählter Eigenschaften der Sinneskanäle nach [Johanssen \(1993\)](#), [PReVENT \(2006\)](#) und [Schmidt u. a. \(2000\)](#)

Fahrzeugführungsebene relevanten visuellen Informationen werden nach [Luczak \(1998\)](#) im ikonischen und akustische Informationen im echoischen Speicher für einen Zeitraum von 0,25 bis 2 Sekunden abgelegt. Weitere sinnesorganspezifische Kennwerte können [Johanssen \(1993\)](#) oder [Schmidt u. a. \(2000\)](#) entnommen werden.

### Analyse der menschlichen Fahraufgabe

Das Verhalten des Fahrers unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Die Fahraufgabe kann im Dreiebenenmodell nach [Donges und Naab \(1996\)](#) in die

- Stabilisierungsebene,
- Fahrzeugführungsebene und
- Navigationsebene

gegliedert werden. In [Abbildung 2.10](#) werden die drei Ebenen aufgeschlüsselt. Der Stabilisierungsebene werden Fahrmanöver zugeordnet, die im physikalischen Grenzbereich des Fahrzeugs anzusiedeln sind. Dort muss der Fahrer im Millisekundenbereich reagieren. Seine Handlung ist dann weitestgehend auf Erfahrungen und Reaktionen begründet, die mentale Komplexität ist vergleichsweise gering. Hier wird der Fahrer von Fahrdynamikregelsystemen, wie dem etablierten ABS (**A**nti-**B**lockier-**S**ystem) oder ESP (**E**lektronisches-**S**tabilitäts-**P**rogramm),

Fahraufgabe	Stabili- sierung	<div>Erfahrung/Routine</div> <div>Mentale Komplexität</div>	Virtueller Fahrer	Reaktionszeit langsamer als Fahrerreaktion	Eingriff	Fahrdynamik- regelsysteme
	Fahrzeug- führung		Virtueller Beifahrer	Reaktionszeit größer als Fahrerreaktionszeit	Regelung Empfehlung Warnung Information	Assistenz- systeme
	Navigation		Virtueller Passagier		Empfehlung Information	Navigations- systeme

Abbildung 2.10: Dreiebenenmodell der Fahraufgabe nach Donges und Naab (1996)

unterstützt. Der Eingriff der Fahrdynamikregelsysteme erfolgt oftmals schneller, als der Fahrer reagieren kann.

Auf der Fahrzeugführungsebene erfolgt die Interaktion zeitlich im Sekundenbereich. Auf dieser Ebene arbeiten vorrangig Komfortsysteme, die den Fahrer in Standardfahrsituationen warnen, informieren oder ihm assistieren. Derartige Systeme sollen den Fahrer so unterstützen, dass die Fahrsicherheit erhöht wird. Als Beispielsysteme seien der Spurhalteassistent (LKA - *L*ane *K*eeping *A*ssist) oder das ACC Stop&Go (*A*ddaptive *C*ruise *C*ontrol) genannt.

Auf der Navigationsebene ist die mentale und kognitive Beanspruchung für den Fahrer am höchsten. Die zu bewältigenden Aufgaben dauern oftmals mehrere Minuten, z. B. für den Fall, dass eine Fahrtroute geplant wird. Typische Assistenzsysteme in diesem Bereich sind Navigationssysteme. Derartige Systeme beeinflussen nicht direkt das Lenkverhalten des Fahrers. Die zeitliche Zuordnung der verschiedenen Ebenen nach Donges (2009) ist in in Abbildung 2.11 dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich die Fahrerassistenzsysteme betrachtet, die als Komfort- und Sicherheitssystem auf der Bahnführungsebene aktiv sind.

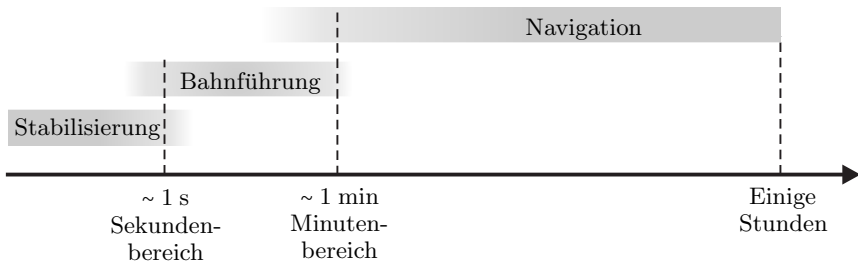


Abbildung 2.11: Zeithorizonte der Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene nach Donges und Naab (1996)

Eine mögliche Klassifizierung der FAS auf der Fahrzeugführungsebene wird in Abbildung 2.12 vorgestellt. Die Klassifizierung erfolgt einerseits in Systeme, die den Fahrer bei der Längsführung oder der Querführung bei der Fahraufgabe unterstützen. Andererseits wird zwischen aktiven und passiven Systemen unterschieden. Die passiven Systeme haben eher informierenden Charakter und verwenden hauptsächlich den visuellen und akustischen Interaktionskanal zum Fahrer (z. B. die „Optische Einparkhilfe“), während bei den aktiven Systemen eine komplexe Informationsverarbeitung durchgeführt werden muss und durch einen Aktoreingriff Energie in das System Fahrer/Fahrzeug eingebracht wird (z. B. der Bahnführungsassistent). Hier wird hauptsächlich der haptische bzw. der vestibuläre Interaktionskanal angesprochen. Oftmals verfügen derartige Systeme zusätzlich über visuelle und akustische Warnelemente.

Aufgrund der hohen Systemvielfalt und der unterschiedlichen Interpretationen der Systeme können einige Systeme nicht eindeutig den passiven oder aktiven FAS zugeordnet werden, wodurch ein unscharfer Definitionsbereich entsteht. Weiterhin sind Längs- und Querführung nicht zwangsläufig entkoppelt, so dass FAS existieren, die auf der Längs- und Querführungsebene parallel agieren (z. B. das „Automatische Einparken“).

Die aufgeführten FAS haben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sie sollten lediglich einige bekannte Systeme repräsentativ darstellen, um einen Eindruck von der Klassifizierungslogik zu erhalten. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein integrales Querführungsassistenzsystem, welches aus einem Spurverlassensassistenten, einem Bahnführungsassistenten und einem innovativen Spurwechselassistenten besteht, erarbeitet.

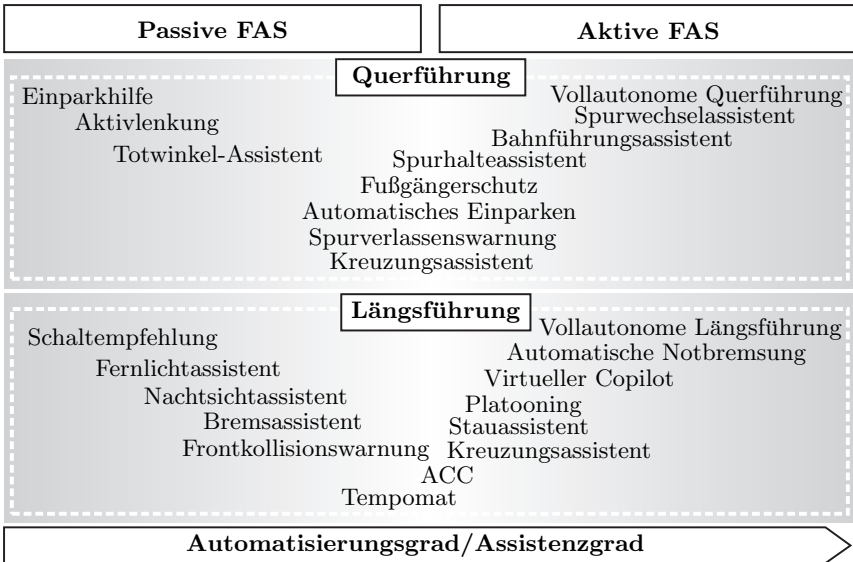


Abbildung 2.12: Klassifikation von Fahrerassistenzsystemen auf der Bahnführungsebene

Aufgrund der Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen können nicht alle Systeme im Detail erläutert werden. An dieser Stelle soll lediglich auf einige weitere Literaturquellen ausgewählter FAS verwiesen werden. Einen Überblick aktueller Forschungstätigkeiten im Bereich Einparkassistentz kann aus [Reeds und Shepp \(1990\)](#), [Mirtich und Canny \(1992\)](#), [Fraicharda und Scheuerb \(2004\)](#), [Kochem \(2006\)](#), [Müller und Deutscher \(2007\)](#) und [Reif \(2010\)](#) abgeleitet werden.

Strategien, um zukünftig auch autonomes Notausweichen zu realisieren, werden beispielsweise in [Rossetter \(2003\)](#), [Ameling \(2006\)](#), [Bender und Landau \(2006\)](#), [Switkes \(2006\)](#) und [Brandt u. a. \(2008\)](#) vorgestellt.

Im Bereich der Längsdynamikregelung werden die klassischen ACC-Systeme zunehmend optimiert. Weitere Informationen dazu können in [Persson u. a. \(1999\)](#), [Venhovens u. a. \(2000\)](#), [Yi u. a. \(2001\)](#), [Zambou \(2005\)](#) und [Winner u. a. \(2009a\)](#) nachgeschlagen werden.

Auch Frontkollisionswarnsysteme und die automatische Notbremsung finden Einzug in Serienfahrzeugen. Details dazu können [Kiesewetter u. a. \(1997\)](#), [Weiße \(2003\)](#), [Bender \(2008\)](#) oder der ISO15623 entnommen werden.

Die Weiterentwicklung aktiver Fußgängerschutzsysteme ist ebenfalls Gegenstand der Forschung. Als weiterführende Literatur kann beispielsweise [Tiemann \(2009\)](#), [Tiemann u. a. \(2010\)](#) oder [Meinecke \(2010\)](#) genannt werden.

Das Fahrerverhalten bei automatischen Brems- und Lenkeingriffen eines FAS wird in [Bender und Landau \(2006\)](#), [Bender u. a. \(2007a\)](#), [Bender u. a. \(2007b\)](#) im Rahmen des PRORETA-Projektes vorgestellt.

Die dynamische Analyse der automatischen Querregelung von Fahrzeugen wird in [Auckland u. a. \(2006\)](#) gezeigt. Die Fusion verschiedener FAS wird beispielsweise in [Schorn \(2007\)](#) oder [Freyer \(2008\)](#) behandelt.

Den maximalen Grad der Fahr-Automatisierung bildet das vollautonome Fahren. Obwohl das autonome Fahren aus rechtlicher Sicht fragwürdig ist, wird in einigen Forschungsgruppen aktiv daran gearbeitet. In der *DARPA Urban Challenge* wurde im Jahr 2007 bereits die Leistungsfähigkeit autonomer Fahrzeuge unter Beweis gestellt (siehe z. B. [Dickmanns u. a. \(1994\)](#), [Bertozzi u. a. \(2000\)](#), [Franke u. a. \(2001\)](#), [Kammel \(2009\)](#)). Das US-Amerikanische Unternehmen Google hat zusammen mit der TU Braunschweig autonome Fahrzeuge entwickelt, die ohne Fahrereingriff bereits mehr als 200.000 km in Kalifornien zurückgelegt haben.

Im folgenden werden die Grundlagen für das in dieser Arbeit entwickelte Konzept kurz vorgestellt, wobei in diesem Abschnitt vorrangig auf die Funktionsweise und nicht auf die unterlagerten Algorithmen eingegangen wird.

### 2.3.2 Spurverlassens-, Spurhalte- und Bahnführungsassistent

Ein Drittel aller tödlichen Unfälle in Deutschland resultiert aus einem unbeabsichtigten Spurverlassen oder Spurwechsel<sup>4</sup>. Ein Spurhalteassistent ist nach [ISO17361](#) ein Fahrerassistenzsystem, das den Fahrer unterstützt, wenn das Fahrzeug gefährdet ist, von der Fahrspur abzukommen. Grundsätzlich werden durch derartige Systeme die Fahrsicherheit und bei bestimmter Auslegungscharakteristik auch der Fahrkomfort erhöht. Zur Realisierung werden unterschiedliche Strategien verfolgt, die von einem einfachen Warnton – passives System – beim Überfahren der Spurbegrenzungsmarkierung bis hin zur aktiven Bahnführung – aktives System – durch ein Assistenzmoment am Lenkrad oder durch differenzielles Bremsen reichen.

---

<sup>4</sup>Statistisches Bundesamt 2011.

Ein Spurhalteassistenzsystem erfasst die Fahrbahnrandmarkierung mit einer Kamera, die meist im Innenspiegel des Fahrzeugs montiert ist. Durch einen Bildverarbeitungsalgorithmus – meist mit statistischen und modellbasierten Verfahren – wird dann die relative Position des Fahrzeugs in der Fahrspur berechnet (siehe dazu [Dickmanns und Zapp \(1986\)](#), [Kluge und Thorpe \(1992\)](#), [Pomerleau \(1995\)](#), [Behringer \(1996\)](#) und [Franke u. a. \(2007\)](#)). Oftmals stellen die Algorithmen noch weitere Informationen, wie die Winkelposition des Fahrzeugs relativ zur Fahrspur, die Fahrspurbreite und die Krümmung, bereit. In seltenen Fällen werden auch Infrarotsensoren (z. B. Citroen AFIL-System) zur Detektion der Fahrbahnrandmarkierungen eingesetzt. Hier wird eine veränderte Reflektanz auf den Markierungen erkannt.

### Spurverlassensassistent

Der Spurverlassensassistent kann im Grenzfall noch als passives – rein warnendes System – definiert werden. Passive Systeme werden oftmals durch die Berechnung der Distanz (DLC: *Distance to Line Crossing*) oder der Zeit (TLC: *Time to Line Crossing*) bis zum Überfahren der Fahrbahnrandmarkierung realisiert. Eine Variante zur Berechnung der TLC wird in Abschnitt 4.2.1 vorgestellt.

Durch gerichtete akustische Warnungen – beispielsweise über den linken und rechten Lautsprecher – oder visuelle Anzeigen im Kombiinstrument kann der Fahrer bei Unterschreitung eines definierten Schwellwertes für die TLC oder den DLC gewarnt werden. Vorteile sind hier in der kostengünstigen Realisierung zu sehen, Nachteile bestehen darin, dass – insbesondere bei akustischen Systemen – auch alle Passagiere über das Fahr- bzw. Fehlverhalten des Fahrers informiert werden.

Weiterhin werden haptische Warnungen durch eingeprägte Lenkradvibration (z. B. Audi, BMW, Mercedes) oder Vibrationen im Sitz (z. B. Citroen) genutzt. Der Vorteil liegt bei der Lenkradvibration insbesondere darin, dass die Warnung genau an dem für die Verhinderung des Spurverlassens verantwortlichen Bedienelement (Lenkrad) zum Fahrer kommuniziert wird. Hat der Fahrer die Hände nicht am Lenkrad, so wird die Warnung den Fahrer nicht erreichen. Die Sitzvibration kann richtungsabhängig eingeprägt werden und bietet somit einen Informationsgewinn. Um die Stärken der verschiedenen Konzepte zu kombinieren, besteht die Möglichkeit, auch mehrere Interaktionskanäle parallel oder sequentiell anzusprechen.

Um eine angemessene Systemakzeptanz zu gewährleisten, müssen die Systeme zuverlässig arbeiten und dürfen den Fahrer nicht bevormunden. Das System muss also die Fahrerintention erkennen. Bei einem gewünschten Spurwechsel darf keine Warnung ausgegeben werden. Strategien und Hintergründe zur Fahrerintentionserkennung werden beispielsweise in [Batavia \(1999\)](#), [Kim und Oh \(2003\)](#), [Schmitz \(2004\)](#), [Rauch u. a. \(2008\)](#) oder [Reichart \(2008\)](#) diskutiert. Auch eine Adaption der Warnstrategie auf Basis der physischen Verfassung des Fahrers (z. B. Müdigkeit) sollte eingeführt werden, so dass ein müder Fahrer beispielsweise früher gewarnt wird als ein vitaler, aufmerksamer Fahrer. Beispiele zur Fahreraufmerksamkeitskontrolle werden in [Hargutt \(2000\)](#), [Hargutt \(2001\)](#), [Ji u. a. \(2004\)](#), [Artaud u. a. \(2004\)](#), [Daimler \(2009\)](#) und [Kopf \(2005\)](#) gezeigt.

### Aktive Systeme: Spurhalte- und Bahnführungsassistent

Aktive Systeme, die den Fahrer durch ein Überlagerungsmoment im Lenkrad Assistenz bieten, haben nach [DMT \(2007\)](#) eine höhere Kundenakzeptanz. Derartige Systeme können weiter in Spurhalte- und Bahnführungsassistenten differenziert werden.

Die Spurhalteassistentensysteme greifen oftmals erst kurz vor dem Verlassen der Fahrspur oder ab einer definierten Querabweichung im Verhältnis zur Spurbreite durch einen gezielten Drehmomentimpuls oder einen überlagerten Lenkwinkel ein. Das Überlagerungsmoment basiert in den meisten Anwendungsfällen auf einer Kennlinie. In [Abbildung 2.13](#) werden verschiedene Kennlinien zur Gestaltung des Überlagerungsmomentes auf Basis der Fahrzeugquerablage dargestellt. Wichtig ist, dass die gestellten Überlagerungsmomente jederzeit vom Fahrer überstimmt werden können.

Eine Alternative besteht darin, einen Lenkradwinkel, beispielsweise durch ein *Harmonic-Drive*- oder Planetengetriebe, im Lenkgetriebe zu überlagern oder durch differentiell Bremsen ein korrigierendes Giermoment aufzubringen. Die technische Realisierung von Drehmoment- und Lenkwinkelüberlagerung im Lenkungsstrang werden in [Reimann u. a. \(2009\)](#) oder [Pfeffer und Harrer \(2011\)](#) detailliert beleuchtet. Die Systeme sind oftmals nicht geeignet, um autonomes Fahren zu realisieren. Insbesondere im Fall des Sekundenschlafs oder bei der Ablenkung durch Sekundäraufgaben bieten die Systeme jedoch einen enormen Zugewinn an Fahrsicherheit. In einer Vielzahl von Studien – wie beispielsweise [Naab und Reichart \(1994\)](#), [Ishida u. a. \(1999\)](#), [Ishida u. a. \(2003\)](#) oder etwa [Gayko \(2005\)](#) – wurde bereits gezeigt, dass aktive Spurhalteassistenten sowohl

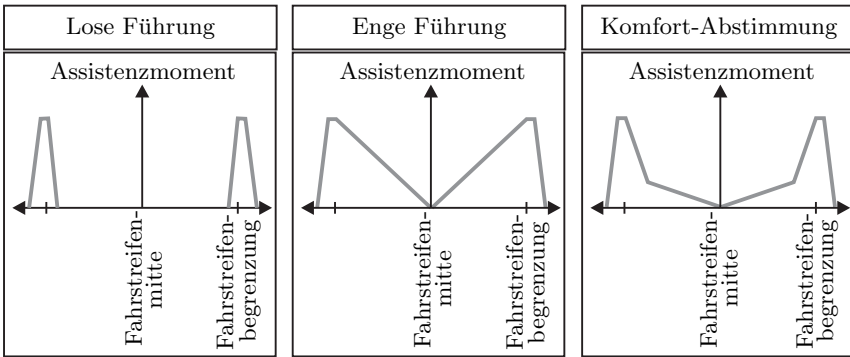


Abbildung 2.13: Exemplarische Assistenzmomentkennlinien in Abhängigkeit der Querablage nach Gayko (2009)

subjektiv als auch objektiv zur Verringerung der Fahrerbeanspruchung und Erhöhung der Spurhaltequalitäten beitragen.

Ein Bahnführungsassistent ist eine Erweiterung des Spurhalteassistenten um einen intelligenten Bahnführungsalgorithmus. Auf Basis der im Fahrzeug verfügbaren Sensorinformationen wird in jeder Fahrsituation ein optimaler Lenkradwinkel berechnet. Dieser Lenkradwinkel wird mit dem Fahrer-Lenkradwinkel verglichen und bildet die Basis für die Gestaltung der Assistenz. Oftmals wird bei derartigen Systemen direkt aus der Spurmittellage geregelt, so dass der Fahrer kontinuierlich unterstützt wird. Auch ein aktives Zurücklenken auf die Fahrspur ist möglich. Neben Lenkmoment- und Lenkwinkelüberlagerung kann auch hier das differenzielle Bremsen über das ESP genutzt werden, um das benötigte Giermoment aufzubringen.

Insbesondere der Bahnführungsassistent kann das Fahrsicherheitsgefühl derart erhöhen, dass der Fahrer sich zunehmend und über längere Zeitabschnitte Sekundäraufgaben widmet (siehe DMT (2007)). Es ist demnach wichtig festzustellen, ob der Fahrer noch aktiv lenkt. Eine Möglichkeit zur sogenannten *Hands-Off-Detection* wird in Abschnitt 5.3.3 hergeleitet.

Omae und Shimizu (2006) vergleichen diverse Strategien zur Realisierung der Spurhalte-Assistenzfunktion. So wird der Eingriff über eine Variation des Lenkradmoments, der Lenkradwinkelgeschwindigkeit und des Lenkradwinkels verglichen. Mögliche Regelungsansätze für die Querregelung von Fahrzeugen entlang einer Bahn werden in Kehl (2007) vorgestellt. Weitere Entwicklungen können



beispielsweise Weilkes u. a. (2006), Gayko (2009), Kölbl und Zahn (2006) und Sentouh u. a. (2006) entnommen werden. In Kapitel 4 wird die mathematische Auslegung eines innovativen Gesamtsystems detailliert gezeigt.

Theoretisch kann der Bahnführungsassistent bei entsprechender Parametrierung als Regelsystem für das autonome Fahren eingesetzt werden. In aktuellen Forschungsprojekten, wie beispielsweise die DARPA Urban Challenge (Darpa (2011)), wird dies in kontrollierten Umgebungen bereits demonstriert. Doch die im öffentlichen Straßenverkehr auftretenden, nicht deterministischen Umwelteinflüsse und die haftungsrechtlichen Probleme verhindern derzeit im Wesentlichen die Einführung des autonomen Fahrens.

In Tabelle 2.8 werden einige bereits jetzt am Markt verfügbare Spurverlassens- und Spurhalteassistenten ausgewählter OEMs dargestellt. Insbesondere für die aktiven Spurhalte- und Bahnführungsassistenten ergibt sich die Besonderheit, dass Systeme, die aktiv eingreifen, eine elektrische Lenkunterstützung oder einen Zusatzaktor benötigen. Der Systemmarkteintritt derartiger Systeme erfolgt nicht – wie bei vielen weiteren Innovationen – in der Oberklasse, sondern in der Mittelklasse (z. B. VW Passat CC). Aufgrund der verhältnismäßig geringen Fahrzeugmasse wurden elektrische Lenkunterstützungssysteme erst in Kleinwagen und der Mittelklasse eingeführt. Der elektrische Aktor ist also ohnehin verfügbar und verursacht keine zusätzlichen Systemkosten.

In Tabelle 2.7 werden einige Kennwerte aktueller Spurhalteassistentensysteme – basierend auf Gayko (2009) – dargestellt. Die Grenzen liegen zum einen im begrenzten Sensorerfassungsbereich, zum anderen in der bisher nicht vorhandenen Erfassung der Fahrsituation sowie in der Kopplung zu Sekundärsystemen wie beispielsweise dem ACC begründet.

### 2.3.3 Spurwechselassistent

Der Spurwechselassistent erhöht insbesondere die Fahrsicherheit beim Fahrstreifenwechsel. Durch Analyse der GIDAS-Datenbank<sup>5</sup> kommt Bartels u. a. (2009) zu der Aussage, dass ca. fünf Prozent aller Unfälle auf Landstraßen und Autobahnen durch einen Fehler beim Spurwechsel entstehen.

<sup>5</sup>GIDAS: *German In-Depth Accident Study*; Größte Unfalldatenbank Deutschlands, die in einem Kooperationsprojekt zwischen bast, FAT, Ford, VW, Daimler, BMW, Opel und der Medizinischen Hochschule Hannover gepflegt wird.

Kenngröße	Typische Werte
Untere Geschwindigkeitsgrenze	65–80 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Obere Geschwindigkeitsgrenze	110–180 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Maximales, korrigierendes Lenkmoment	2–3 Nm
Unterstützte Spurbreite	3–4 m
Minimaler Kurvenradius	230 m
Maximale Querbearbeitung	2 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Tabelle 2.7: Arbeitsintervalle ausgewählter Kenngrößen für aktuelle Spurhalteassistentensysteme nach Gayko (2009)

Diese Unfälle resultieren beispielsweise aus einer fehlerhaften Spiegeleinstellung oder durch das Ausbleiben eines Schulterblicks. Fahrzeuge im Toten Winkel<sup>6</sup> können dann nicht erkannt werden und bilden somit potentielle Kollisionsobjekte. Weiterhin wird die Differenzgeschwindigkeit von herannahenden Fahrzeugen oftmals falsch eingeschätzt, so dass besonders schnell von hinten auffahrende Fahrzeuge im Fall eines Spurwechsels nicht mehr bremsen können und ein Unfall resultiert.

Zur Erfassung der für den Spurwechsel gefährlichen Fahrzeuge können Nahbereichsradarsensoren (24 GHz) im Heck- und Seitenbereich des Fahrzeugs oder Kameras im Außenspiegel eingesetzt werden. Aktuelle Systeme nutzen als Mensch-Maschine-Schnittstelle optische Elemente im Bereich der Außenspiegel, die ein- oder mehrstufig angesteuert werden, sowie akustische Warnungen.

Das in Kapitel 4 vorgestellte Spurwechselassistentensystem nutzt zusätzlich eine gerichtete Lenkradmomentüberlagerung, um den Fahrer vor einem Unfall beim Spurwechsel zu bewahren. Daimler nutzt im aktuellen Totwinkel-Assistenten kurz vor der seitlichen Kollision das differentielle Bremsen, um ein korrigierendes Giermoment und somit auch ein Gegenlenken des Fahrzeugs zu erreichen.

Die Spurwechselassistentenklassifizierung erfolgt nach ISO17387 „Lane Change Decision Aid System“ nach Ausprägung der Assistenz. Weiterhin wird ein Systemzustandsdiagramm vorgeschlagen. Bei der in Tabelle 2.9 nach ISO17387 gezeigten Klassifizierung nach Art der Sensor-Umfelderfassung werden drei Typen unterschieden. In der Kategorisierung wird zwischen der Überwachung der To-

<sup>6</sup>Bereich neben und hinter dem Fahrzeug, der trotz Außenspiegel nicht ohne einen Schulterblick eingesehen werden kann.

Hersteller-	System-bezeichnung	Geschwindigkeitsbereich	Sensorik	Funktion/MMS
Mercedes-Benz	Spurhalte-assistent	ab $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	Kamera	LDW/ LKW: Akustisch PKW Lenkradvib. Bus: Sitzvibration
BMW	Spurver-lassens-warnung	ab $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	Kamera	LDW/ Lenkradvibration
Audi	Lane-Assist	ab $65 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	Kamera	LDW/ Lenkradvibration
VW	Lane-Assist	ab $65 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	Kamera	LDW, LKA/ Optische Warnung; Lenkradvibration; Überlagerungs-moment
Lexus	Lane Keeping Assist	-	Kamera	LDW, LKA/ Optische, Akustische Warnung; Lenkradvibration; Überlagerungs-moment; ACC-Kopplung
Honda	LKAS: Lane Keeping Assist	ab $65 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ bis $110 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	Kamera	LDW, LKA/ Akust. Warnung; Überlagerungs-moment; ACC-Kopplung
PSA	AFIL: Alarm bei Fahrspur-abweichung durch Infrarot Linien-erkennung	ab $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	6-Infrarot-sensoren an Front- und Heckstoßstange	LDW/ Gerichtete Sitzvibration-

Tabelle 2.8: Auszug der am Markt verfügbaren Spurhalteassistentensysteme

Typ	Überwachung toter Winkel		Überwachung Annäherungszone		Funktion
	links	rechts	links	rechts	
I	■	■			Warnung vor Fahrzeugen im Toten Winkel
II			■	■	Warnung vor Fahrzeugen, die sich von hinten annähern
III	■	■	■	■	Warnung vor Fahrstreifen- wechsel

Tabelle 2.9: Klassifizierung von Spurwechselassistenten nach [ISO17387](#)

ten Winkel und der Annäherungszonen auf der rechten und linken Fahrzeugseite unterschieden. Systeme vom Typ II und III werden weiter durch die maximale Annäherungsgeschwindigkeit  $\tilde{v}^{\text{Obj}}$  und die minimal zulässigen Kurvenradien  $R_{s,\min}$  untergliedert. Die benötigte Sensorreichweite hängt also von

- der maximal zu erfassenden Annäherungsgeschwindigkeit  $\tilde{v}^{\text{Obj}}$ ,
- der Reaktionszeit des Fahrers  $t_{\text{Reaktion}}$  und
- der Systemrechenzeit  $t_{\text{System}}$

ab. Die minimal benötigte Sensorreichweite ergibt sich zu

$$d_{\text{Radar},\min} = \tilde{v}^{\text{Obj}}(t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{System}}). \quad (2.1)$$

Die in Tabelle 2.10 gezeigte Kurvenradienbegrenzung basiert auf dem beschränkten Erfassungswinkel der Radarsensorik und den damit verbundenen Schwierigkeiten bei der Erfassung von Hindernissen auf Strecken mit hohen Krümmungen und der begrenzten zu erwartenden Fahrzeugdynamik. In Abbildung 2.14 wird das zugrunde liegende Systemzustandsdiagramm nach [ISO17387](#) gezeigt. Ob das System aktiv ist, hängt sowohl vom manuellen Einschaltzustand über die Fahrerbedieneinheit als auch von verschiedenen Kriterien, wie beispielsweise der minimalen Aktivierungsgeschwindigkeit oder dem aktuellen Sensorstatus, ab.

Ist das System aktiv, so müssen wiederum bestimmte Voraussetzungen für eine Warnung an den Fahrer gegeben sein, dies kann beispielsweise der Aufenthalt eines Fahrzeugs im Toten Winkel des Ego-Fahrzeugs sein. Der Eskalationsgrad der Warnung kann in mehrere Stufen, je nach Dringlichkeit der zu vermittelnden Warnung des unterlagerten Assistenzsystems, gestaltet werden.

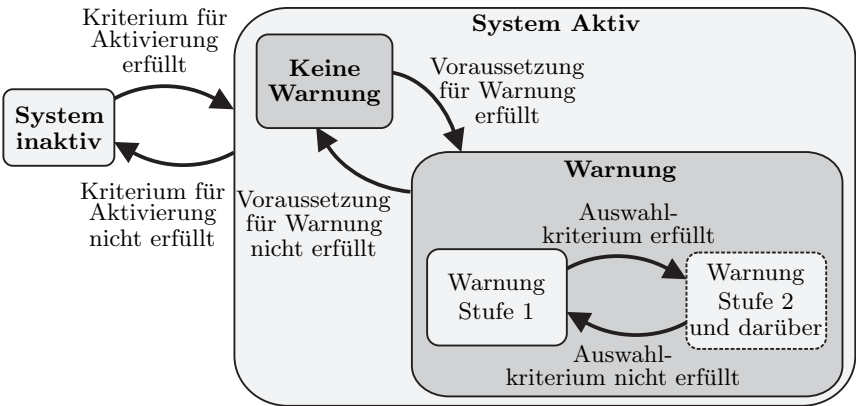


Abbildung 2.14: Systemzustandsdiagramm für einen Fahrstreifenwechselsystemen nach [ISO17387](#)

Warnstufe 1 hat rein informierenden Charakter, während Warnstufe 2 auf Basis einer Spurwechselerkennungsintention eine eindringliche Warnung bis hin zu einem aktiven Eingriff zur Folge hat. Durch Einbezug weiterer Sensorsysteme aus Systemen wie den in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Spurhalteassistenzsystemen können Synergieeffekte genutzt und die Spurwechselintention zuverlässig erkannt werden. Spurwechselsystemen sind in einfachen Realisierungsvarianten bereits bei einigen Fahrzeugherstellern verfügbar. Die Systembezeichnung variiert dabei herstellerspezifisch. Eine Übersicht aktueller Systeme inklusive der verwendeten Sensorik und Mensch-Maschine-Schnittstelle wird in Tabelle 2.11 gezeigt. Lediglich Mercedes-Benz macht derzeit einen aktiven Eingriff über einen ESP-Eingriff (differentielles Bremsen) kurz vor dem Seitenaufrall beim Spurwechsel. Dabei wird durch eine asymmetrische Einleitung von Bremskräften auf linker und

Typ	Max. Relativgeschwindigkeit des sich von hinten annähernden Fahrzeugs	Min. Kurvenradius
A	$10 \frac{\text{m}}{\text{s}} / 36 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	125 m
B	$15 \frac{\text{m}}{\text{s}} / 54 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	250 m
C	$20 \frac{\text{m}}{\text{s}} / 72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	500 m

Tabelle 2.10: Klassifizierung der Annäherungsgeschwindigkeiten nach [ISO17387](#)

Fahrzeug-hersteller	Volvo	Peugeot	Mercedes-Benz	Audi/VW
System-bezeichnung	Blind Spot Information System (BLIS)	Toter Winkel Detektor	Totwinkel-Assistent	Side-Assist
Sensorik	Zwei Kameras im Außen-spiegel	Eine Kamera im linken Außen-spiegel	6x 24 GHz-Radar im Heck- und Frontbereich	2x 24 GHz-Radar im Heckbereich
Funktion	Tote-Winkel-Überwachung	Tote-Winkel-Überwachung & ESP-Brems-eingriff	-	Visuell: Lampen in Spiegelglas; Akustischer Warnton
Aktivierungs-Geschwindigkeit.	10 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$	-	30 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$	30 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
MMS	Visuell: Lampe in linker A-Säule	Visuell: Lampen in A-Säulen	Visuell & Akustisch: Lampen in Spiegel-gläsern	Visuell: Lampen integriert in Spiegel-gehäuse

Tabelle 2.11: Auszug der am Markt verfügbaren Spurwechselassistenten

rechter Achsseite ein korrigierendes Drehmoment um die Fahrzeugvertikalachse erzeugt.

Die Erweiterung derartiger Systeme bis hin zum vollautonomen Fahrstreifenwechsel sind Gegenstand aktueller Forschungsprojekte, die sich oftmals noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine neue Strategie zur Realisierung eines intelligenten Spurwechselassistenten hergeleitet und sowohl in der Simulation als auch in einer Fahrsimulatorstudie getestet. Die mathematischen Grundlagen und die Simulationsergebnisse werden dazu in Abschnitt 4.6 vorgestellt. Die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle auf visueller, akustischer und haptischer Ebene wird in Kapitel 5 definiert. Die abschließende Evaluierung in einer Fahrsimulatorstudie ist Kapitel 6 zu entnehmen.

## KAPITEL 3

---

### Fahrsimulatorkonzept des Lehrstuhls für Mechatronik

---

In diesem Kapitel wird das grundlegende Fahrsimulatorkonzept des Lehrstuhls für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen beschrieben. Der Fahrsimulator wurde im Rahmen dieser Arbeit in großen Teilen von Grund auf mitentwickelt und ist für diese Arbeit besonders wichtig, da der Fahrsimulator im späteren Verlauf der Arbeit eingesetzt wird, um das entwickelte FAS in Probandenversuchen zu evaluieren.

Zu Beginn werden die verschiedenen Simulatorvarianten kurz vorgestellt. Die zur Realisierung benötigte Modellbildung und Simulation wird ebenfalls eingeführt. Beginnend mit der Ausgestaltung des Fahrerarbeitsplatzes und der verfügbaren MMS, wird auch die audiovisuelle Realisierung der virtuellen Realität beschrieben. Abschließend werden einige Anwendungsfelder des Simulators beispielhaft aufgezeigt.

Die Fahrzeugentwicklung steht vor neuen Herausforderungen: Kürzere Entwicklungszeiten bei gleichzeitig steigenden Fahrzeugfunktionen müssen bewältigt werden. Daher sind neue Entwicklungswerkzeuge erforderlich, um die Lücke zwischen Simulation und realen Versuchen mit Prototypen zu schließen. Fahrsimulatoren

sind ein Instrument, um den Fahrer in der frühen Entwicklungsphase zu integrieren. Das ermöglicht, neben der technischen Funktionalität auch das subjektive Empfinden zu testen. Insbesondere bei menschenzentrierten FAS ist dies von besonderer Bedeutung.

Virtuelle Testfahrten erlauben die unmittelbare Einbeziehung des Fahrers. Dies gestattet ohne zusätzlichen finanziellen und zeitlichen Aufwand Rückschlüsse auf die Kundenakzeptanz zu ziehen. Realisiert wird dies durch ein Fahrsimulatorkonzept, bei dem realistische Fahrzeugmodelle auf detaillierten Fahrstreckenmodellen dargestellt und in Probandenstudien dem Fahrer in einer virtuellen Fahrumgebung (Virtual Reality) präsentiert werden.

### 3.1 Struktur des Fahrsimulatorkonzeptes

Das Fahrsimulatorkonzept soll eingesetzt werden, um innovative Fahrzeugsysteme zu entwickeln. Insbesondere wird deshalb der Simulator als sogenannter HIL<sup>2</sup>-Prüfstand eingesetzt. Neben der Integration von realer Hardware (HIL: Hardware In the Loop) kann auch der Mensch (HIL: Human In the Loop) im frühen Stadium des Entwicklungsprozess betrachtet werden.

Der Gesamtablauf ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Im *Preprocessing* wird vorerst der Versuchsablauf geplant. Die gesamte Szenario-Definition inklusive der Verkehrsteilnehmer und der Umwelt erfolgt dort. Weiterhin sind die Simulationsparameter und eventuelle Event-Triggerzeitpunkte festzulegen. Auch die benötigte Hardware und die MMS müssen bereitgestellt werden.

Die Datenverwaltung erfolgt während der Versuchsdurchführung zentral auf einem Datenserver mit *shared memory*<sup>1</sup>.

Die Bedienung wird über eine in MATLAB/Simulink umgesetzte grafische Oberfläche realisiert, hier kann die Simulation aktiv beeinflusst und in den Echtzeitprozess eingegriffen werden.

Die Echtzeitsimulation wird auf einem oder mehreren Mathworks Matlab xPC-Target Echtzeitsystemen gerechnet. So können auch mehrere Simulatoren vernetzt und in einer gemeinsamen virtuellen Realität betrieben werden. Die Einbindung der benötigten Hardware kann über beliebige Schnittstellen, wie beispielsweise CAN oder UDP erfolgen. Weiterhin können auch externe Messtechnik

<sup>1</sup>(shared memory oder dt. „gemeinsam genutzter Speicher“) bezeichnet eine bestimmte Art der Interprozesskommunikation (IPC). Bei dieser Art nutzen zwei oder mehrere Prozesse einen bestimmten Teil des Speichers gemeinsam.



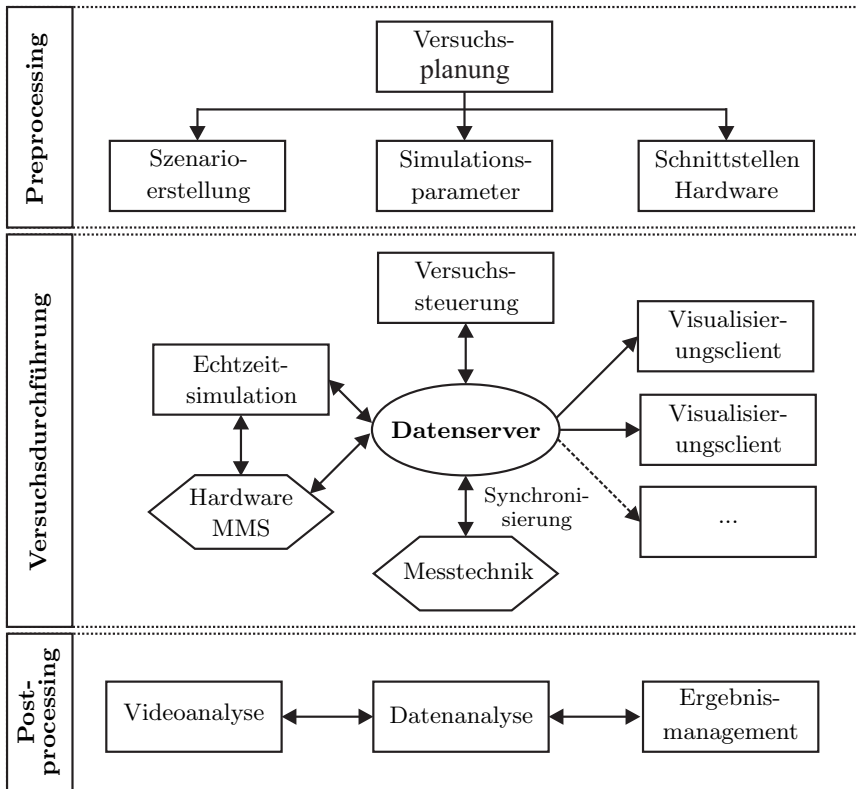


Abbildung 3.1: Gesamtablauf einer Fahrsimulatorstudie

wie beispielsweise physiologische Sensorik oder Kamerasysteme eingebunden und zeitsynchronisiert werden.

Je nach Anwendungsfall variiert die Anzahl der benötigten Visualisierungskanäle. Grundsätzlich können beliebig viele Kanäle eingebunden werden. Blickrichtung und -winkel werden über die Positionierung von virtuellen Kameras in der Visualisierungsengine eingestellt.

Die Versuchsauswertung erfolgt im *Postprocessing*. Neben der Analyse der aufgezeichneten Daten kann auch eine Rekonstruktion des gesamten Versuchs erfolgen. Im Ergebnismanagement werden die Auswertungen verwaltet.

### 3.1.1 Fahrsimulatoren am Lehrstuhl für Mechatronik

Am Lehrstuhl für Mechatronik wurden verschiedene Simulatoren für unterschiedliche Anwendungszwecke entwickelt. In Abbildung 3.2 wird eine Übersicht der Varianten gegeben. Der Design-Simulator ist eine Kooperationsentwicklung mit der





	Variante	Eigenschaften	Systemkomplexität/Immersionsgrad
Design-Simulator		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Extravagantes Design</li> <li>■ Höchstmaß an Mobilität</li> <li>■ Marketing-Objekt</li> <li>■ Interaktive Demonstration von Innovationen</li> <li>■ 3-Kanal-Visualisierung</li> </ul>	
Mockup-Simulator		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Dynamischer Simulator</li> <li>■ Drei Freiheitsgrade</li> <li>■ Bis 2g Beschleunigung</li> <li>■ Kompl. Fahrzeugcockpit</li> <li>■ Force-Feedback-Lenkrad</li> <li>■ Cave-Visualisierung</li> </ul>	
VW Golf-Simulator		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fahrerarbeitsplatz bleibt erhalten</li> <li>■ 2x CAN-Bus</li> <li>■ FIS durch LCD-Displays</li> <li>■ Force-Feedback-Lenkrad</li> <li>■ 2-Kanal-Visualisierung</li> </ul>	
Ford Fiesta-Simulator		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 4xCAN-Bus</li> <li>■ LCD-Displays und LEDs</li> <li>■ Bremssimulator</li> <li>■ Dynamischer Sitz</li> <li>■ Force-Feedback-Lenkrad</li> <li>■ 6-Kanal-Visualisierung</li> </ul>	

Abbildung 3.2: Übersicht aktueller Simulatorvarianten am Lehrstuhl für Mechatronik

Folkwang Universität der Künste und derzeit nur als 3D-Modell verfügbar. Der dynamische Mockup-Simulator besteht aus drei modularen Komponenten: einer hochdynamischen Bewegungsplattform mit drei Freiheitsgraden, einem Original-Fahrzeugcockpit und der Visualisierung. Im Golf-Simulator sitzt der Fahrer an dem gewohnten Fahrerarbeitsplatz, alle Bedienelemente bleiben erhalten. Zusätzlich ist der Simulator mit einem Force-Feedback-Lenkrad ausgestattet. Der komplexeste Simulator ist der Fiesta-Simulator. Der Simulator verfügt über einen dynamischen Sitz, so dass *Motion-Cueing*<sup>2</sup> möglich ist. Das Bremsgefühl wird durch eine elektrische Unterdruckpumpe am Bremskraftverstärker realisiert. Weiterhin wird das Kombiinstrument über ein frei konfigurierbares LCD realisiert, und die Außenspiegel sind mit frei konfigurierbaren Diodenfeldern ausgestattet. Weitere Informationen diesbezüglich können Kapitel 6 entnommen werden.

## 3.2 Modellbildung und Simulation

Die in Abbildung 3.3 aufgeführte Gesamtstruktur der Simulation zeigt einen generellen Überblick über das komplexe Simulationsmodell. Im Rahmen dieser Arbeit können nicht alle Modelle im Detail beschrieben werden. Die mathematische Modellierung und Auslegung der MMS für das entwickelte FAS werden in Kapitel 4 und 5 präsentiert.

Zunächst werden die für die Realisierung eines interaktiven Fahrsimulators notwendigen Komponenten im Zentrum dargestellt. Hier wird das Fahrzeugmodell inklusive Chassis, Radaufhängung, Antriebsstrang und Lenkung simuliert. Je nach Anwendungsfall kommen mehr oder weniger komplexe Fahrzeugmodelle – vom linearen Einspurmodell bis zum komplexen MKS-Modell mit Radaufhängung – zum Einsatz.

Die verfügbaren Fahrzeugmodelle werden in Schramm u. a. (2010a) beschrieben. Die Generierung des synthetischen Lenkradmoments wird in Abschnitt 4.1.3 erklärt. Weitere Details zu den verwendeten Fahrzeug-, Radaufhängungs- und Lenkungsmodellen können Schramm u. a. (2010a), Pfeffer und Harrer (2011) und Mitschke und Wallentowitz (2004) entnommen werden. Die Kopplung zum Fahrer erfolgt über die MMS, so kann der Fahrer mit der Echtzeitsimulation interagieren. Weiterhin werden die in der Simulation generierten Bewegungsdaten und Informationen an die Visualisierungsengine übermittelt. Zusätzlich können

---

<sup>2</sup>Beschleunigungen, die durch Bewegungen des Simulators Kräfte auf den Körper ausüben und so dem Fahrer den Eindruck einer realen Fahrt suggerieren.

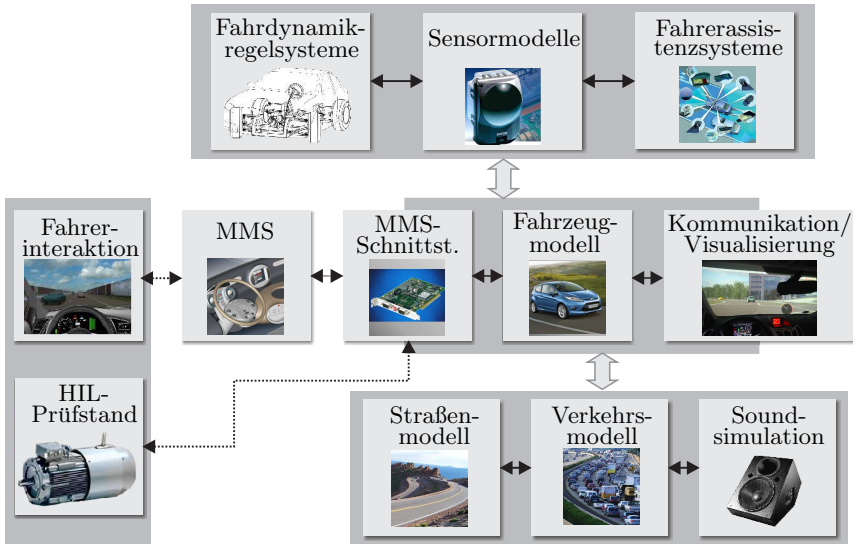


Abbildung 3.3: Simulationsstruktur der Simulator-Softwarearchitektur inklusive Integration von Mensch und Hardware

reale technische Systeme wie beispielsweise ein Antriebsstrang über eine HIL-Einkopplung integriert werden.

Darüber hinaus werden diverse Fahrdynamikregelsysteme (ABS, ESP, TCS, usw.), Sensoren (Radar, Kamera, Ultraschall, usw.) sowie Fahrerassistenzsysteme (ACC, LKA, Autonome Notbremsung, usw.) simuliert.

Für die Realisierung der physikalisch korrekten Simulation der VR müssen sowohl die Straße (Verlauf, Höhenprofil und Querschnitt) als auch der Umgebungsverkehr (Fahrzeuge und Passanten) und der Ton simuliert werden.

### 3.2.1 Strecken- und Szenarienerstellung

Grundsätzlich bestehen verschiedene Möglichkeiten, die virtuelle Teststrecke zu erstellen. Die exakte mathematische Beschreibung der Streckencharakteristik und die entsprechende Visualisierung sind gleichermaßen wichtig.

Zunächst muss sowohl die Trajektorie als auch der Querschnitt (z. B. Spurbreiten) bekannt sein. Von besonderer Bedeutung sind hier die deut-

schen Richtlinien für die Anlage von Straßen (Teil RAS-L [FGSV \(1995\)](#) und RAS-Q [FGSV \(1996\)](#)). Im besten Fall stehen die Streckenkonstruktionsdaten zur Verfügung, so dass die Strecke segmentweise durch die Basiselemente Gerade, Kreisbogen und Klothoide erstellt werden kann. Liegen die Daten nicht vor, so können aus GPS-Messungen oder beispielsweise Google-Maps die relevanten GPS-Koordinatenverläufe extrahiert werden. Über einen geeigneten Optimierungsalgorithmus erfolgt dann die Rekonstruktion der Basiselemente. Details hierzu sind in [Feldmann und Hiesgen \(2011\)](#) zu finden. Weitere Informationen bezüglich der Straßenplanung können [Richter und Hendel \(2008\)](#) und [Esch \(2010\)](#) entnommen werden.

Die für die Visualisierung relevanten Missions-Skripte werden automatisiert erstellt, so dass eine Strecke sowohl korrekt texturiert (Fahrbahnoberfläche und Markierungen) ist als auch realitätsgetreu verläuft.

### 3.2.2 Verkehrsmodell

Für die Realisierung des Umgebungsverkehrs werden einfache, kinematische Modelle in Anlehnung an [Treibner und Helbing \(2002\)](#) und [Hochstädter u. a. \(2000\)](#) verwendet. Die Längs- und Querregelung wird mit einem einfachen Fahrermodell nach [Hochstädter u. a. \(2000\)](#) durchgeführt. Die Einhaltung einer geringen Modellkomplexität muss hier besonders beachtet werden, um eine möglichst hohe Anzahl von virtuellen Verkehrsteilnehmern parallel in Echtzeit simulieren zu können.

## 3.3 Fahrerarbeitsplatz: Cockpit und MMS

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle, bestehend aus einem Force-Feedback-Lenkrad, dem Lenkstock, der Pedalerie, den Instrumenten, den haptischen, visuellen und akustischen Warnelementen, dem Sound und der Visualisierung, stellt das Bindeglied zwischen Fahrer und Simulation dar. Der Fahrer kann interaktiv durch eine virtuelle Welt fahren und über die Interaktionskanäle agieren und Rückmeldungen erhalten. Je nach Simulatorvariante können verschiedene Hardwarekomponenten für die Realisierung verwendet werden. Die Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten Variante kann Kapitel 6 entnommen werden.

### 3.3.1 Lenkungsaktor

Der Lenkungsaktor stellt eine der zentralen Schnittstellen zum Fahrer dar. Da der Lenkungsaktor genutzt werden soll, um sowohl die aus der Fahrdynamik resultierende Drehmomente am Lenkrad als auch die Drehmomente, die von den Fahrerassistenzsystemen angefordert werden, möglichst präzise und realitätsnah darzustellen, liegen die Hauptanforderungen in einer ausreichenden Leistung und in einer möglichst hohen Dynamik, da auch Drehmomentvibrationen realisiert werden sollen, mit einem kleinen Getriebeispiel und in einer möglichst geringen inneren Motorreibung bzw. -dämpfung.

Die Anforderungen werden von dem in Abbildung 3.4 gezeigten SENSODRIVE SENSO-Wheel SD-LC weitestgehend erfüllt. Die vom Hersteller angegebenen Spezifikationen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Die Vorteile liegen zum einen darin, dass der Antrieb keine störende Drehmomentwelligkeit aufweist und aufgrund der Verwendung von Präzisionslagern sehr reibungsarm ist. Auch der Verzicht auf ein Getriebe trägt weiter zur hohen Feinfühligkeit bei. Durch das hohe maximale Drehmoment können Endanschläge simuliert werden. Das SENSO-Wheel verfügt über einen integrierten Winkelencoder, so dass ein zusätzlicher Sensor nicht montiert werden muss.

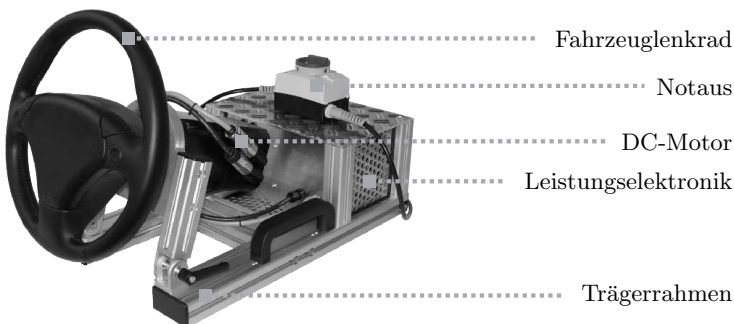


Abbildung 3.4: Lenkungsaktor SENSO-Wheel SD-LC der Firma SENSODRIVE nach SENSODRIVE (2011)

Schnittstelle	CAN (1 MBaud; 1 ms Zykluszeit)
Nenn-/Maximaldrehmoment	7,5/16,5 Nm
Lenkraddrehzahl	$> 200 \frac{\text{U}}{\text{min}}$
Drehmomentauflösung	0,03 Nm
Winkelauflösung	0,009 Grad

Tabelle 3.1: Technische Daten des SENSO-Wheel SD-LC nach [SENSODRIVE \(2011\)](#)

### 3.4 Visualisierung und Sound

Die Visualisierung ist ein essentieller Bestandteil des Simulators. Zur Realisierung einer möglichst tiefen Immersion wird die Visualisierung mit der 3D-Spieleengine Torque 3D durchgeführt. Um für den Betrachter stets eine hohe Bildqualität zu gewährleisten, sollte eine Bildwiederholungsrate von 25 Hz nicht unterschritten werden. Dies muss bei der Komplexität der Szenariengestaltung Beachtung finden.

Für die Bildgenerierung können wahlweise Projektoren oder LCD zum Einsatz kommen. Projektoren bieten ein verhältnismäßig großes Bild, wobei die Pixelanzahl im Verhältnis zur Bildgröße relativ klein ist. Weiterhin leidet die Bildqualität in hellen Umgebungen stark. LCD sind hochauflösend und bieten auch in einem hellen Umfeld eine gute Bildqualität. Um zum Projektor identische horizontale und vertikale Blickwinkel zu erreichen, sind jedoch deutlich mehr Geräte zu verwenden. Mit Projektoren kann beispielsweise ein CAVE<sup>3</sup> mit 360-Grad-Blickwinkel verhältnismäßig einfach realisiert werden.

Ein horizontaler Blickwinkel von 120 Grad sollte nach [Jamson \(2000\)](#) eingehalten werden, um einen angemessenen optischen Fluss und einen realistischen Geschwindigkeitseindruck zu generieren. Weitere Analysen zum optischen Fluss in Fahrsimulatoren sind in [Cemeny und Penerai \(2003\)](#) und [Durkee \(2010\)](#) dokumentiert.

Wird zusätzlich ein Bewegungssystem im Simulator verwendet, sind Bildbewegungen – insbesondere Nicken und Wanken – exakt mit dem Bewegungssystem ab-

<sup>3</sup>Cave Automatic Virtual Environment (Höhle mit automatisierter, virtueller Umwelt) bezeichnet einen Raum zur Projektion einer dreidimensionalen Illusionswelt der virtuellen Realität.

zustimmen, um der Kinetose<sup>4</sup> (Simulatorkrankheit) vorzubeugen. Die Geräusche von Motor, Reifen, Wind, Umgebungsverkehr und die Warntöne der FAS können als 3D-Ton – inklusive Dopplereffekt – erzeugt und über ein Lautsprechersystem bereitgestellt werden.

### 3.5 Anwendungsbeispiele

Derzeit werden die Simulatoren in den in Abbildung 3.5 gezeigten Bereichen eingesetzt. Dabei liegt die Anwendung in Forschung, Entwicklung, Probandenstudien, Modellverifikation und Demonstration neuer automobiler Systeme. So unterschiedlich die Einsatzgebiete sind, eine Gemeinsamkeit existiert immer: Der Fahrer kann durch den Einsatz von Fahrsimulatoren zu einem frühen Zeitpunkt in den Entwicklungsprozess integriert werden. Die Betrachtung des subjektiven Empfindens findet Berücksichtigung und kann so in Weiterentwicklungen berücksichtigt werden.

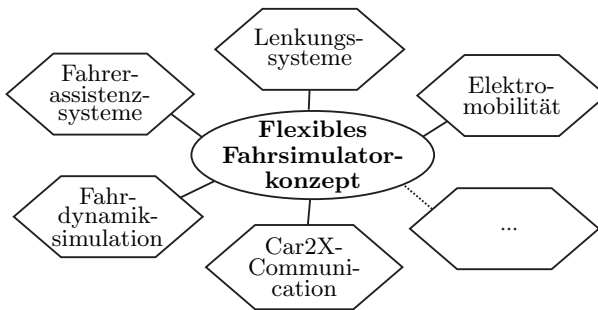


Abbildung 3.5: Einsatzgebiete des flexiblen Fahrsimulorkonzeptes

Weitere Informationen bezüglich der Simulatoren und Anwendungsbeispiele sind Brandt u. a. (2008), Hiesgen u. a. (2008), Hesse u. a. (2009a), Hesse u. a. (2009b), Hiesgen (2009), Schramm u. a. (2010b), Hiesgen und Schramm (2011), Feldmann und Hiesgen (2011) und Koppers u. a. (2011) zu entnehmen.

<sup>4</sup> Reise-, Bewegungskrankheit, fachsprachlich Kinetose, nennt man die körperlichen Reaktionen wie Blässe, Schwindel, Kopfschmerz, Übelkeit und Erbrechen, die durch ungewohnte Bewegungen etwa in einem Verkehrsmittel oder in einem Wolkenkratzer ohne ausreichende Schwingungstilgung ausgelöst werden können.



---

### Modellbasierte Auslegung des Querführungsassistenzsystems

---

In diesem Kapitel wird die modellbasierte Auslegung des entwickelten Querführungsassistenzsystems beschrieben. Das integrale Fahrerassistenzsystem besteht aus einem Bahnführungs-, Spurverlassens- und Spurwechselassistenten. Die Systeme werden zunächst separat entwickelt und dann zusammen mit der Definition des MMS fusioniert.

Für die Entwicklung des Bahnführungsassistenten wird zunächst das lineare Gesamtsystem – bestehend aus dem linearen Einspur- und Lenkungsmodell nach Mitschke und Wallentowitz (2004) und dem Bahnführungsassistenten – hergeleitet. Ergänzend dazu werden verschiedene Fahrermodelle implementiert und mit dem Modell kombiniert. Somit kann die menschliche Reaktion in ihren Grundzügen analysiert werden, bevor das System realen Probanden präsentiert wird. Die Reaktion eines Menschen auf die haptische Assistenz kann jedoch nur sehr eingeschränkt modelliert werden. Um jedoch die Basisparameter und die Stabilität des Gesamtsystems abschätzen zu können, ist diese Methode sehr gut geeignet. Weiterhin wird die Realisierung des Spurverlassensassistenten dargestellt. Abschließend wird der auf der Fuzzy-Methode basierende Spurwechselassistent vorgestellt.

In diesem Kapitel werden die für die Realisierung der Systeme notwendigen mathematischen Modelle hergeleitet, ihre Verarbeitung und die MMS-Strategie wird in Kapitel 5 erläutert.

## 4.1 Bahnführungsregler in Kombination mit dem Einspurmodell

Als Ziel wird zunächst die Herleitung der Übertragungsfunktionen des linearen Gesamtsystems angestrebt. Somit können die Analysewerkzeuge der Regelungstechnik, wie beispielsweise die Sprungantwort oder die Störübertragung, im Zeit- und im Frequenzbereich analysiert werden. Da der zu entwickelnde Bahnführungsassistent für die Anwendung im Komfortbereich ausgelegt wird, gewährleistet das lineare Einspurmodell eine ausreichende Genauigkeit.

### 4.1.1 Herleitung des Einspurmodells

Das im Folgenden verwendete lineare Einspurmodell basiert grundsätzlich auf [Riekert \(1940\)](#). Die zur mathematischen Beschreibung relevante Nomenklatur kann Abbildung 4.1 entnommen werden. Die wesentlichen, vereinfachenden Annahmen bestehen in

- der Kombination der rechten und linken Achshälfte,
- der Festlegung der  $z$ -Koordinate des Schwerpunkts auf Höhe der Fahrbahn,

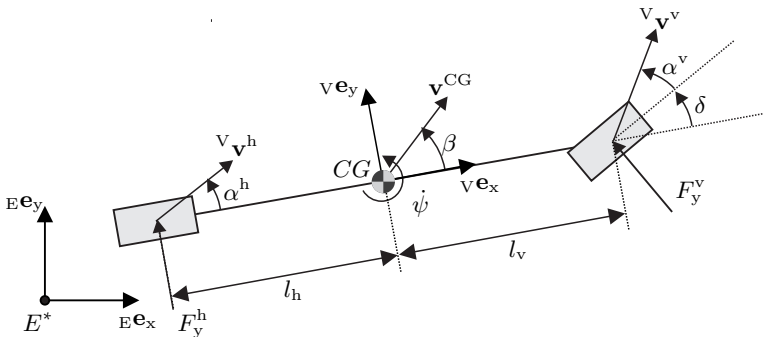


Abbildung 4.1: Darstellung des Einspurmodells auf Basis von [Riekert \(1940\)](#)

- der Vernachlässigung von Roll- und Wankbewegung,
- der konstanten Fahrzeuglängsgeschwindigkeit,
- den konstanten Reifenlängskräften,
- dem linearen System- und Reifenverhalten und
- der Vernachlässigung aerodynamischer Effekte.

Die Modellgültigkeit ist bis zu einer Querbewegung von  $a_y^{\text{CG}} \approx 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  gewährleistet. Der Geschwindigkeitsvektor im Fahrzeugschwerpunkt ergibt sich mit dem Betrag

$$v^{\text{CG}} = \|\mathbf{v}^{\text{CG}}\| \quad (4.1)$$

zu

$$\mathbf{v}^{\text{CG}} = v^{\text{CG}} \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

Durch Differenzieren berechnet sich die Schwerpunktsbeschleunigung zu

$$\mathbf{a}^{\text{CG}} = \frac{d\mathbf{v}^{\text{CG}}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}^{\text{CG}} \quad (4.3)$$

$$= v^{\text{CG}} \begin{bmatrix} -\sin \beta \dot{\beta} \\ \cos \beta \dot{\beta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times v^{\text{CG}} \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$= v^{\text{CG}} (\dot{\psi} + \dot{\beta}) \begin{bmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Die Bewegungsgleichung mit der Fahrzeugmasse  $m$ , der Fahrzeugquerbeschleunigung  $a_y^{\text{CG}}$ , dem Schwimmwinkel  $\beta$ <sup>1</sup>, dem Radlenkwinkel  $\delta$  und den Reifenquerkräften an Vorder- und Hinterachse  $F_y^{\text{v,h}}$  ergibt sich für die Querrichtung zu

$$mv^{\text{CG}} (\dot{\psi} + \dot{\beta}) \cos \beta = F_y^{\text{v}} \cos \delta + F_y^{\text{h}}. \quad (4.6)$$

<sup>1</sup>Der Schwimmwinkel  $\beta$  beschreibt den Winkel zwischen der Tangente an die Bahnkurve des Fahrzeugschwerpunktes und der Fahrzeuglängsachse

Für den Drallsatz um die Fahrzeugvertikalachse ergibt sich mit dem konzentrierten Fahrzeugträgheitsmoment  $J_z$

$$J_z \ddot{\psi} = F_y^v \cos \delta l_v + F_y^h l_h. \quad (4.7)$$

Die linearen Bewegungsgleichungen resultieren dann unter der Annahme von sehr kleinen Winkeln  $|\delta|, |\beta| \ll 1$  zu

$$mv^{\text{CG}} (\dot{\psi} + \dot{\beta}) = F_y^v + F_y^h \quad (4.8)$$

$$J_z \ddot{\psi} = F_y^v l_v + F_y^h l_h. \quad (4.9)$$

Für die Berechnung der Reifenquerkräfte an Vorder- und Hinterachse wird ein lineares Reifenmodell verwendet. Die Schräglaufsteifigkeit  $c_{\alpha}^{v'}$ , welche den linearen Zusammenhang zwischen Reifenquerkraft und Schräglaufwinkel  $\alpha^{v2}$  an der Vorderachse beschreibt, setzt sich aus der Lenkungs- und Reifensteifigkeiten zusammen. Die kombinierte Steifigkeit ergibt sich somit zu

$$c_{\alpha}^{v'} = \frac{c_{\alpha}^v}{1 + \frac{c_{\alpha}^v n^v}{c_L}}. \quad (4.10)$$

Unter den Annahmen, dass die Lenkungssteifigkeit  $c_L$  um Größenordnungen höher ist als die Reifensteifigkeit  $c_{\alpha}^v$  und die Reifennachlaufstrecke  $n^v$  klein ist, kann  $c_{\alpha}^v \approx c_{\alpha}^{v'}$  gesetzt werden. Die Dynamik des Lenkungssystems wird wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben.

Die Reifenquerkräfte an den jeweils achsweise zusammengefassten Vorder- und Hinterreifen werden somit zu

$$F_y^{v,h} = c_{\alpha}^{v,h} \alpha^{v,h} \quad (4.11)$$

berechnet. Die Herleitung der Schräglaufwinkel  $\alpha^{v,h}$  erfolgt über die Reifenkinematik bezüglich der Bewegung des Fahrzeugchassis. Für die translatorische Geschwindigkeit im Vorderrad  ${}^v \mathbf{v}^v$  – dargestellt im fahrzeugfesten Koordinatensystem – ergibt sich

$${}^v \mathbf{v}^v = \begin{bmatrix} v^{\text{CG}} \cos \beta \\ v^{\text{CG}} \sin \beta + l_v \dot{\psi} \\ 0 \end{bmatrix} = v^{\text{CG}} \begin{bmatrix} \cos(\delta - \alpha^v) \\ \sin(\delta - \alpha^v) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

<sup>2</sup>Der Schräglaufwinkel beschreibt den Winkel zwischen der Tangente der Radbahnkurve und der Reifenmimttelebene.

Daraus folgt dann für die kinematische Beziehung des Schräglaufwinkels an der Vorderachse mit

$$\tan(\delta - \alpha^v) = \frac{v^{\text{CG}} \sin \beta + l_v \dot{\psi}}{v^{\text{CG}} \cos \beta} \quad (4.13)$$

und der Linearisierung für sehr kleine Winkel

$$\alpha^v = \delta - \beta - l_v \frac{\dot{\psi}}{v^{\text{CG}}}. \quad (4.14)$$

An der Hinterachse bestehen die Zusammenhänge

$${}^v \mathbf{v}^h = \begin{bmatrix} v^{\text{CG}} \cos \beta \\ v^{\text{CG}} \sin \beta - l_h \dot{\psi} \\ 0 \end{bmatrix} = v^{\text{CG}} \begin{bmatrix} \cos \alpha^h \\ \sin \alpha^h \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

und

$$-\tan \alpha^h = \frac{v^{\text{CG}} \sin \beta - l_h \dot{\psi}}{v^{\text{CG}} \cos \beta}. \quad (4.16)$$

Der linearisierte kinematische Zusammenhang an der Hinterachse berechnet sich dann zu

$$\alpha^h = -\beta + l_h \frac{\dot{\psi}}{v^{\text{CG}}}. \quad (4.17)$$

Die resultierenden linearen Bewegungsgleichungen ergeben sich somit zu

$$m v^{\text{CG}} \dot{\beta} + (m (v^{\text{CG}})^2 + c_\alpha^v l_v - c_\alpha^h l_h) \frac{\dot{\psi}}{v^{\text{CG}}} + (c_\alpha^v + c_\alpha^h) \beta = c_\alpha^v \delta \quad (4.18)$$

und

$$J_z \ddot{\psi} + (c_\alpha^v l_v^2 + c_\alpha^h l_h^2) \frac{\dot{\psi}}{v^{\text{CG}}} + (c_\alpha^v l_v - c_\alpha^h l_h) \beta = c_\alpha^v l_v \delta. \quad (4.19)$$

Weiterführende Beschreibungen der Modellherleitung können Schramm u.a. (2010a) und Mitschke und Wallentowitz (2004) entnommen werden.

## Übertragungsfunktionen des linearen Einspurmodells

Das Fahrzeug stellt im Gesamtregelkreis die Regelstrecke – also das technische System, welches geregelt werden soll – dar. Um im weiteren Verlauf der Mo-

dehlerleitung die Systemformulierung aus regelungstechnischer Sicht zu ermöglichen, sollen im Folgenden die entkoppelten Bewegungsgleichungen mit der Laplacetransformation hergeleitet werden. Zunächst werden dazu die stationären Kreisfahrwerte und einige wichtige fahrdynamische Kenngrößen hergeleitet.

Ein essentieller Parameter zur Beschreibung des Eigenlenkverhaltens ist der sogenannte Eigenlenkgradient  $EG$ . Der für die lineare Querdynamik gültige Eigenlenkgradient hängt im wesentlichen von den als konstant angenommenen Reifeneigenschaften, der Fahrzeugmasse, der Schwerpunktslage und dem Radstand ab und ergibt sich zu

$$EG = \frac{m}{l} \frac{(c_\alpha^h l_h - c_\alpha^v l_v)}{c_\alpha^v c_\alpha^h}. \quad (4.20)$$

Das grundlegende Eigenlenkverhalten lässt sich wie folgt bestimmen:

$$EG \begin{cases} < 0 & \text{Übersteuerndes Eigenlenkverhalten} \\ = 0 & \text{Neutralsteuerndes Eigenlenkverhalten} \\ > 0 & \text{Untersteuerndes Eigenlenkverhalten.} \end{cases} \quad (4.21)$$

Eine weitere wichtige fahrdynamische Kenngröße ist nach Mitschke und Wallentowitz (2004) die charakteristische bzw. die kritische Fahrzeuggeschwindigkeit. Wenn als Systemeingang (Lenkwinkel) für ein übersteuerndes Fahrzeug bei der kritischen Geschwindigkeit ein Lenkungssprung gewählt wird, verhält sich das Fahrzeug regelungstechnisch betrachtet instabil. Für ein untersteuerndes Fahrzeug erreicht die statische Gierübertragungsfunktion bei der charakteristischen Geschwindigkeit

$$v_{ch} = \sqrt{\frac{l^2 c_\alpha^v c_\alpha^h}{m(c_\alpha^h l_h - c_\alpha^v l_v)}} \quad (4.22)$$

ihr Maximum.

Die Übertragungsfunktionen für ein untersteuerndes Fahrzeug im eingeschwungenen Zustand – anschaulich durch die stationäre Kreisfahrt beschrieben – werden im Folgenden mit dem Index  $[\dots]_{\text{stat}}$  bezeichnet. Der Gierverstärkungsfaktor – also das Verhältnis zwischen Gierrate  $\dot{\psi}$  und Radlenkwinkel  $\delta$  – ergibt sich für

ein untersteuerndes Fahrzeug mit dem Radstand  $l$  und der charakteristischen Geschwindigkeit  $v_{\text{ch}}$  zu

$$\left[ \frac{\dot{\psi}}{\delta} \right]_{\text{stat}} = \frac{1}{l} \frac{v^{\text{CG}}}{1 + \left[ \frac{v^{\text{CG}}}{v_{\text{ch}}} \right]^2}. \quad (4.23)$$

Weiterhin ist der Schwimmwinkel  $\beta$  eine zentrale Größe für die Beschreibung der Fahrzeugbewegung und -dynamik. Die Schwimmwinkelübertragungsfunktion im stationären Fall kann mit den Abständen von Fahrzeugschwerpunkt zur Vorder- und Hinterachse  $l_{\text{v,h}}$  durch

$$\left[ \frac{\beta}{\delta} \right]_{\text{stat}} = \frac{l_{\text{h}}}{l} \frac{1 - \frac{ml_{\text{v}}}{c_{\text{h}}^{\text{h}} l_{\text{h}} l} (v^{\text{CG}})^2}{1 + \left[ \frac{v^{\text{CG}}}{v_{\text{ch}}} \right]^2} \quad (4.24)$$

beschrieben werden. Im stationären Fall kann die Quergeschwindigkeit des Fahrzeugs  $^{\text{v}}v_{\text{y}}^{\text{CG}}$  mit

$$\left[ \frac{^{\text{v}}v_{\text{y}}^{\text{CG}}}{\delta} \right]_{\text{stat}} = \frac{1}{l} \frac{v^2}{1 + \left[ \frac{v}{v_{\text{ch}}} \right]^2} \quad (4.25)$$

dargestellt werden.

Um auch den transienten Teil – also das instationäre Einschwingverhalten des Fahrzeugs nach einer Lenkbewegung – beschreiben zu können, werden im Folgenden die entkoppelten Bewegungsgleichungen aus den Gleichungen (4.18) und (4.19) in Standardform hergeleitet. Mit den Zeitkonstanten

$$T_{z\beta} = \frac{J_z v^{\text{CG}}}{c_{\alpha}^{\text{h}} l_{\text{h}} l - l_{\text{v}} m (v^{\text{CG}})^2} \quad (4.26)$$

und

$$T_{z\psi} = \frac{mv^{\text{CG}} l_{\text{v}}}{c_{\alpha}^{\text{h}} l} \quad (4.27)$$

ergeben sich

$$\ddot{\beta} + 2\sigma\dot{\beta} + \nu^2\beta = \frac{c_{\alpha}^{\text{v}}(c_{\alpha}^{\text{h}} l_{\text{h}} l - m(v^{\text{CG}})^2 l_{\text{v}})}{J_z m (v^{\text{CG}})^2} (\delta + T_{z\beta}\dot{\delta}) \quad (4.28)$$

und

$$\ddot{\psi} + 2\sigma\dot{\psi} + \nu^2\psi = \frac{c_\alpha^v c_\alpha^h l_h l}{J_z m v^{\text{CG}}} (\delta + T_{z\psi} \dot{\delta}). \quad (4.29)$$

Auf Basis der Standardform können so direkt die ungedämpfte Eigenkreisfrequenz des dynamischen Systems

$$\nu = \sqrt{\frac{c_\alpha^v c_\alpha^h l^2 + m(v^{\text{CG}})^2 (c_\alpha^h l_h - c_\alpha^v l_v)}{J_z m (v^{\text{CG}})^2}} \quad (4.30)$$

und die Abklingkonstante<sup>3</sup>

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{m(c_\alpha^v l_v^2 + c_\alpha^h l_h^2) + J_z (c_\alpha^v + c_\alpha^h)}{J_z m v^{\text{CG}}} \quad (4.31)$$

bestimmt werden. Das LEHR'SCHE Dämpfungsmaß  $D$  beschreibt die Dämpfung einer Schwingung. Mit der Abklingkonstante  $\sigma$  und der ungedämpften Eigenkreisfrequenz  $\nu$  ergibt sich

$$D = \frac{\sigma}{\nu}. \quad (4.32)$$

Das LEHR'SCHE Dämpfungsmaß ermöglicht nach [Lunze \(2010\)](#), die Aussagen

$$D \begin{cases} < 0 & \text{Schwingungsfähiges System} \\ = 0 & \text{Grenzfall} \\ > 0 & \text{Monotones System} \end{cases} \quad (4.33)$$

über die Dynamik des Gesamtsystems zu machen. Die gedämpfte Eigenkreisfrequenz ergibt sich zu

$$\nu_D = \nu \sqrt{1 - D^2}. \quad (4.34)$$

Die dynamische Übertragungsfunktion für den Fahrzeuggierwinkel im Frequenzbereich kann mit der Zeitkonstanten  $T_{z\dot{\psi}}$  durch

$$F_\psi(s) = \left[ \frac{\psi}{\delta} \right] = \left[ \frac{\dot{\psi}}{\delta} \right]_{\text{stat}} \frac{1 + T_{z\dot{\psi}} s}{1 + \frac{2\sigma}{\nu^2} s + \frac{1}{\nu^2} s^2} \frac{1}{s} \quad (4.35)$$

<sup>3</sup>Die Abklingkonstante ist bei linearen Schwingungssystemen mit einem Freiheitsgrad das Produkt aus ungedämpfter Eigenkreisfrequenz und LEHR'SCHER Dämpfung. Bei positivem Vorzeichen klingt die Schwingung ab, bei negativem Vorzeichen nimmt die Amplitude der Schwingung exponentiell zu.



beschrieben werden. Unter Verwendung der Zeitkonstanten  $T_{z\beta}$  ergibt sich die dynamische Schwimmwinkelübertragungsfunktion im Frequenzbereich zu

$$F_\beta(s) = \left[ \frac{\beta}{\delta} \right] = \left[ \frac{\beta}{\delta} \right]_{\text{stat}} \frac{1 + T_{z\beta}s}{1 + \frac{2\sigma}{v^2}s + \frac{1}{v^2}s^2}. \quad (4.36)$$

Zur Berechnung der Querposition im ortsfesten Weltkoordinatensystem wird die Querpositionsübertragungsfunktion

$$F_y(s) = v^{\text{CG}} \frac{1}{s} \quad (4.37)$$

verwendet.

#### 4.1.2 Linearisierung des Pacejka-Reifenmodells

Die Reglervorauslegung erfolgt mit einem linearen Gesamtsystemmodell. Die Reifenparameter haben einen entscheidenden Einfluss auf das dynamische Verhalten des Fahrzeugs. Als Referenzfahrzeug sollen die Parameter eines Audi A8 D2, basierend auf Öttingen (2005), verwendet werden.

Zur Erstellung eines linearen Modells werden hier die aus dem verfügbaren PACEJKA-Modell nach Pacejka (2006) resultierenden Parameter um den Arbeitspunkt linearisiert werden. Die Aufgabe besteht darin, die resultierenden Schräglauftiefigkeiten  $c_\alpha^{v,h}$  zu bestimmen. Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird angewendet, um den in Abbildung 4.2 gezeigten, näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen Schräglaufwinkel  $\alpha^{v,h}$  und der resultierenden Querkraft  $F_y^{v,h}$  zu approximieren.

#### 4.1.3 Modellierung des Lenkungssystems

Ziel des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Lenkungsmodells ist in erster Linie die Synthese realistischer Lenkradmomente für den Fahrer im Fahrsimulator. Das Lenkungsmodell basiert auf Mitschke und Wallentowitz (2004) und wird mit Eingängen für Servo- und Assistenzmoment erweitert. Abbildung 4.3 zeigt das Lenkungsersatzmodell mit den zugehörigen Systemgrößen. Dieses Lenkungsmodell wird im Rahmen der in Kapitel 6 vorgestellten Fahrsimulatorstudie genutzt, um das Lenkmoment im Fahrsimulator möglichst realistisch zu gestalten. Das Gesamtmoment am Lenkrad ist eine Kombination aus Fahrdynamikmomenten, welche im wesentlichen aus den Reifenquerkräften an der Vorderachse und der

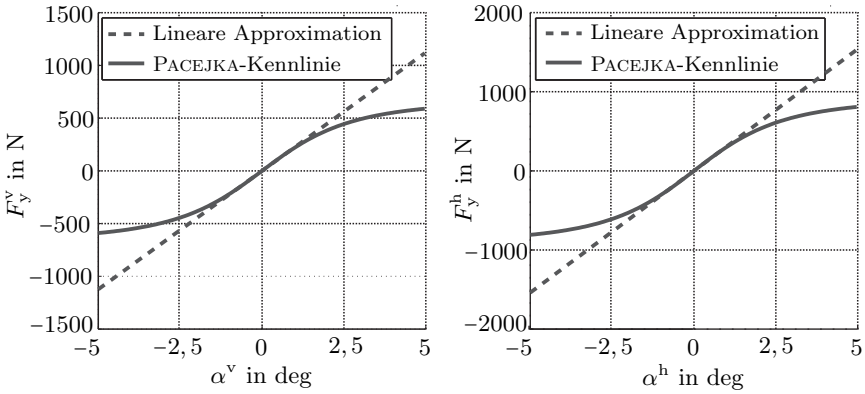


Abbildung 4.2: Lineare Approximation der Schräglauftiefigkeiten an Vorder- und Hinterachse

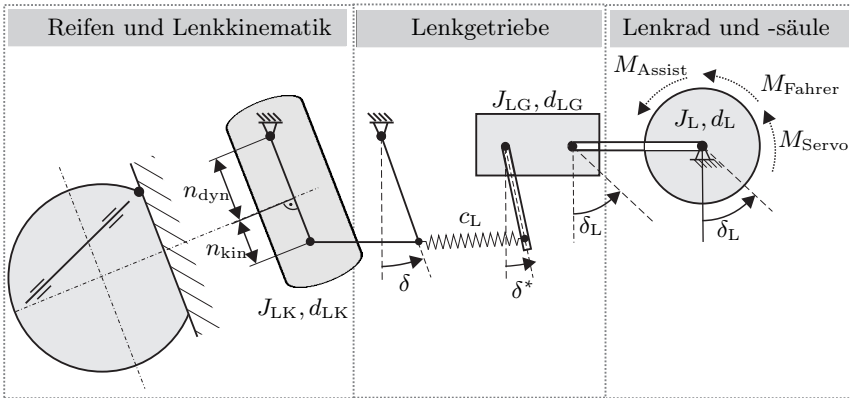


Abbildung 4.3: Ersatzmodell des Lenkungssystems nach Brandt u. a. (2008)

Achskinematik resultieren, dem Unterstützungsmoment der Servolenkung und dem Assistenzmoment der Fahrerassistenzsysteme. Das Lenksystem lässt sich in drei Teilsysteme unterteilen. Das erste Teilsystem ist die Lenksäule mit Lenkrad (Trägheit  $J_L$ , Dämpfung  $d_L$ ). Bei der Modellierung liegt die Annahme einer

elektrischen Servolenkung mit *Column Drive* (siehe Pfeffer und Harrer (2011)) zugrunde. Auf das Lenkrad wirkt somit vereinfacht das Lenkradmoment

$$M_L = M_{\text{Fahrer}} + M_{\text{Assist}} + M_{\text{Servo}}. \quad (4.38)$$

Das Servomoment ist hochgradig nichtlinear und wird auf Basis von Fahrzeug-, Lenkgeschwindigkeit und Fahrerhandmoment ausgelegt. Das resultierende Moment wird verlustfrei auf das Lenkgetriebe mit der Übersetzung  $i_L$  übertragen. Das Lenkgetriebe hat die Massenträgheit  $J_{LG}$  und die Dämpfung  $d_{LG}$ . Das ideal übertragene Moment mit dem entsprechenden Lenkwinkel  $\delta_L$  wird im Getriebe in das entsprechende Ausgangsmoment und den Winkel  $\delta^*$  gewandelt. Diese Größen werden dann über einen masselosen Hebel und eine Feder (Federsteifigkeit  $c_L$ ) an das Lenkgestänge übertragen. Auf dieses dritte Teilsystem wirken die am Reifen angreifenden Seitenkräfte, die zu  $F_y^v$  kombiniert werden. Über den konstruktiven bzw. kinematischen Nachlauf  $n_{\text{kin}}$  und den dynamischen Nachlauf  $n_{\text{dyn}}$  wirkt so ein Rückstellmoment um die Hochachse des Reifens.

Die drei gekoppelten Systemgleichungen ergeben sich im Zustandsraummodell zu

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \ddot{\delta} \\ \dot{\delta}_L \\ \ddot{\delta}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{c_L}{J_L} & -\frac{d_{LK}}{J_{LK}} & \frac{c_L}{i_L J_{LK}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{c_L i_L}{J_L i_L^2 + J_{LG}} & 0 & \frac{-c_L}{J_L i_L^2 + J_{LG}} & \frac{d_L i_L^2 + d_{LG}}{J_L i_L^2 + J_{LG}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \\ \delta_L \\ \dot{\delta}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{n_{\text{kin}} + n_{\text{dyn}}}{J_{LK}} & \frac{1}{J_{LK}} & \frac{1}{J_{LK}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{\text{driver}} \\ F_y^v \\ M_{\text{Servo}} \\ M_{\text{Assist}} \end{bmatrix}.$$

Das Zustandsraummodell hat vier Zustandsgrößen: den Lenkwinkel  $\delta$ , dessen zeitliche Änderung  $\dot{\delta}$ , den Lenkradwinkel  $\delta_L$  sowie dessen Ableitung  $\dot{\delta}_L$ . Als Eingänge auf das System wirken ebenfalls vier Größen: das Moment des Fahrers am Lenkrad  $M_{\text{Fahrer}}$ , die Seitenkraft am Reifenlatsch  $F_y^v$ , das Moment der Servolenkung  $M_{\text{Servo}}$  und das Assistenzmoment  $M_{\text{Assist}}$ .

Die Seitenkraft  $F_y^v$  ergibt sich aus Fahrzeug- und Reifenparametern sowie dem aktuellen Fahrzeugzustand und stellt das Bindeglied zwischen Lenkungs- und Fahrzeugmodell dar.

Das Servomoment  $M_{\text{Servo}}$  und das Assistenzmoment  $M_{\text{Assist}}$  werden von dem Servolenkungsaktor direkt auf die Lenksäule hinter dem Lenkrad aufgebracht (EPS Column Drive). Für weitere Details bezüglich der konstruktiven Umsetzung sei auf [Pfeffer und Harrer \(2011\)](#) verwiesen.

#### 4.1.4 Parameter des Audi A8 D2

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Audi A8 Modell D2 beispielhaft für die Auslegung der Reglers und somit auch für die Fahrzeugsimulation verwendet. Die Auswahl ist damit zu begründen, dass die Fahrzeugparameter bereits aus [Öttgen \(2005\)](#) bekannt sind (siehe dazu Tabelle A.2) und ein Entwicklungspartner in der Industrie über ein ähnliches Fahrzeug, das mit der notwendigen Sensorik und Aktorik ausgestattet ist, verfügt. So können die Ergebnisse aus der Simulation und den Fahrstudien direkt im realen Prototypfahrzeug validiert werden. Weiterhin eignet sich das Fahrzeug hervorragend für die Entwicklung eines komfortbasierten Fahrerassistenzsystems.

## 4.2 Spurverlassens- und Bahnführungsassistent

Im Folgenden werden sowohl der Algorithmus zur Ermittlung des Spurverlassens als auch der Bahnführungsassistent hergeleitet. Dazu werden zunächst einige Kenn- und Regelgrößen eingeführt.

In Abbildung 4.4 können die Querabweichung  $\tilde{y}$  und die Winkelabweichung  $\tilde{\psi}$  im Führungskoordinatensystem  $F^*$  betrachtet werden.  $\tilde{y}$  beschreibt den kürzesten Abstand zwischen Fahrzeugschwerpunkt und der Solltrajektorie. Die relative Winkelabweichung  $\tilde{\psi}$  ist der Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor des Fahrzeugs im Fahrzeugschwerpunkt und der Tangente an den aktuellen Referenzpunkt auf der Solltrajektorie.

Für hochdynamische Anwendungen wie beispielsweise das Notausweichen sollte der Schwimmwinkel  $\beta$  wie folgt

$$\tilde{\psi}^* = \psi - \beta - \psi_S \quad (4.39)$$

Berücksichtigung finden. Üblicherweise ist der Schwimmwinkel im realen Fahrzeug keine direkt messbare Größe, so dass dieser nur in der Simulation direkt vorliegt und im realen Fahrzeug durch geeignete Verfahren geschätzt bzw. – wie beispielsweise [von Vietinghoff u. a. \(2005\)](#) gezeigt – beobachtet werden muss. Für

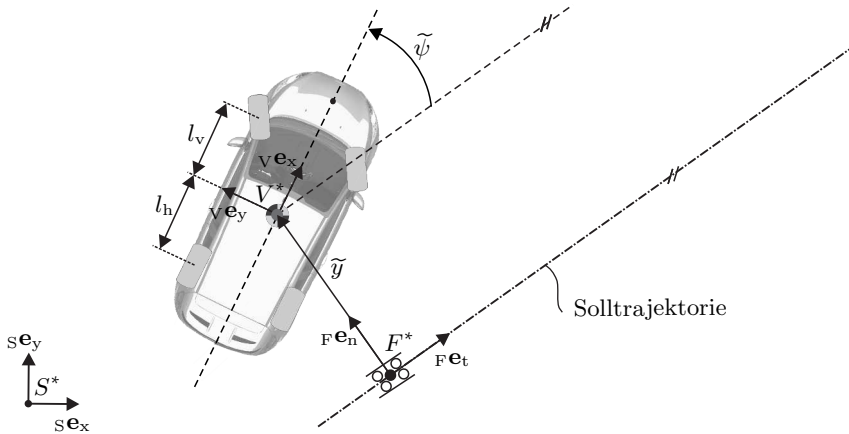


Abbildung 4.4: Regelabweichungen des Fahrzeugs relativ zur Solltrajektorie

die Auslegung des Bahnführungsassistenten als Komfortsystem kann aufgrund von kleinen zu erwartenden Schwimmwinkeln

$$\tilde{\psi} = \psi - \psi_S \quad (4.40)$$

Anwendung finden. Somit ist  $\tilde{\psi}$  positiv, wenn  $v e_x$  im Führungskoordinatensystem eine positive Normalkomponente hat.

### 4.2.1 Spurverlassensassistent

Der Spurverlassensassistent hat die Aufgabe, den Fahrzeugführer bei einem ungewollten Spurverlassen zu warnen. Unabhängig von der Wahl der verwendeten Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Kommunikation der Warnung, die in Kapitel 5 genauer beleuchtet wird, muss das ungewollte Spurverlassen zunächst durch einen geeigneten Algorithmus detektiert werden. Unter der Annahme, dass das Fahrzeug über ein Kamerasystem wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben verfügt, wird nun auf Basis der lateralen Spurabweichung  $\tilde{y}$ , der relativen Winkelabweichung  $\tilde{\psi}$ , der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{CG}$  und den bekannten geometrischen Parametern wie Radstand und Spurweite die Spurverlassenserkenennung hergeleitet. Dazu wird kontinuierlich die Zeit berechnet, bis eines der beiden Vorderräder

die zugehörige Fahrbahnmarkierung touchiert. Diese Zeit wird im Folgenden mit  $TLC^4$  bezeichnet.

In Abbildung 4.5 wird eine beispielhafte Fahrsituation dargestellt, die zukünftig zum Überfahren der Fahrbahnmittellinie führen würde. Die Solltrajektorie – hier die Flächenhalbierende parallel zum Straßenverlauf – ist durch die gepunktete Linie gekennzeichnet. Weiterhin werden eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{CG}$  und kleine Lenkwinkel  $\delta_L$  angenommen.

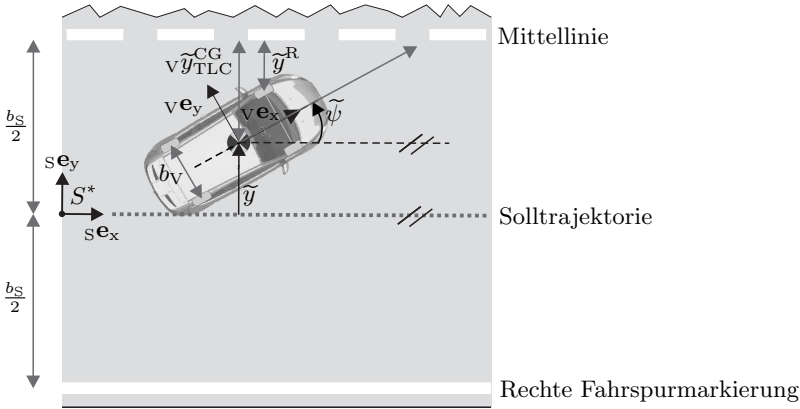


Abbildung 4.5: Berechnungsgrundlagen für die  $TLC$

Grundsätzlich kann der aktuelle Abstand des Vorderrades, das nach Abbildung 4.5 aktuell gefährdet ist, die Fahrbahnrandmarkierung zu überfahren, kinematisch mit

$$\tilde{y}^R = v \tilde{y}_{TLC}^{CG} - l_v \sin(\tilde{\psi}) - \frac{b_v}{2} \cos(\tilde{\psi}) \quad (4.41)$$

berechnet werden. Um den Zeitpunkt des Überfahrens der Fahrbahnrandmarkierung zu berechnen, muss die zukünftige Fahrzeugbewegung extrapoliert werden. Der Abstand des Fahrzeugschwerpunktes zur Fahrbahnrandmarkierung  $v \tilde{y}_{TLC}^{CG}(t)$  kann in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{CG}$  zu

$$v \tilde{y}_{TLC}^{CG}(t) = v \tilde{y}_{TLC}^{CG}(t_0) - \sin(|\tilde{\psi}|) v^{CG} t \quad (4.42)$$

<sup>4</sup> $TLC$ : Time to Line Crossing.

linear extrapoliert werden. Wird nun die Gleichung (4.42) in die Gleichung (4.41) integriert, ergibt sich die zeitabhängige Entfernung des kritischen Vorderrades zur Fahrbahnrandmarkierung zu

$$\tilde{y}^R(t) = {}_V\tilde{y}_{TLC}^{CG}(t_0) - \sin(|\tilde{\psi}|)v^{CG}t - l_v \sin(\tilde{\psi}) - \frac{b_v}{2} \cos(\tilde{\psi}). \quad (4.43)$$

Der Fall des Spurmarkierungsüberfahrens tritt für  $\tilde{y}^R(t) \stackrel{!}{=} 0$  ein. Durch Umstellung von Gleichung (4.42) mit Gleichung (4.43) kann die aktuelle Zeit bis zum Spurmarkierungsüberfahren zu

$$TLC = \frac{{}_V\tilde{y}_{TLC}^{CG}(t_0) - l_v \sin(|\tilde{\psi}|)v^{CG}t - \frac{b_v}{2} \cos(\tilde{\psi})}{\sin(|\tilde{\psi}|)v^{CG}} \quad (4.44)$$

berechnet werden. Für die Berechnung der inertialen Querabweichung des Fahrzeugschwerpunktes  ${}_V\tilde{y}_{TLC}^{CG}(t_0)$  kann insgesamt zwischen den vier charakteristischen Fahrsituationen

$${}_V\tilde{y}_{TLC}^{CG}(t_0) = \begin{cases} \tilde{y} > 0 & \begin{cases} \tilde{\psi} < 0 : & \frac{b_v}{2} - \tilde{y} \\ \tilde{\psi} < 0 : & \frac{b_v}{2} + \tilde{y} \end{cases} \\ \tilde{y} < 0 & \begin{cases} \tilde{\psi} < 0 : & \frac{b_v}{2} - \tilde{y} \\ \tilde{\psi} > 0 : & \frac{b_v}{2} + \tilde{y} \end{cases} \end{cases} \quad (4.45)$$

unterschieden werden. Weiterhin muss

$$|{}_V\tilde{y}_{TLC}^{CG}(t_0)| > l_v \sin(|\tilde{\psi}|) + \frac{b_s}{2} \cos(\tilde{\psi}) \quad (4.46)$$

gültig sein, da sonst das kritische Vorderrad bereits die Fahrspurmarkierung überfahren hat, der Fahrzeugschwerpunkt jedoch noch nicht. In diesem Spezialfall wird  $TLC \stackrel{!}{=} 0$  gesetzt. Weiterhin ist es theoretisch möglich, dass der Wert für  $TLC$  unendlich groß wird. Um numerische Komplikationen in der Simulation abzufangen, wird auf  $TLC < TLC_{\max}$  limitiert. Wie  $TLC$  genutzt wird, um den Fahrer bei der Querführung zu unterstützen oder ihn zu warnen, wird in Kapitel 5 beschrieben. Im Folgenden wird die analytische Herleitung und Parametrierung des Bahnführungsassistenten gezeigt.

### 4.2.2 Analytische Reglerauslegung des Bahnführungsassistenten

Im Folgenden werden verschiedene Strategien zur Berechnung des Lenkwinkels für Bahnführungsassistenten zur kontinuierlichen Spurführung beschrieben. Die Weiterverarbeitung dieses Reglerlenkwinkels und insbesondere die Kommunikation und Interaktion mit dem Fahrer werden in Kapitel 5 beschrieben. Zur Realisierung der Regelungsaufgabe müssen sowohl verschiedene fahrdynamische Größen als auch Messdaten der Umfeldsensorik bekannt sein. Diese sind durch diverse Statusdaten der Fahrzeugsysteme zu ergänzen, hier sei beispielsweise der Betätigungszustand des Blinkers aufgeführt.

Die relevanten fahrdynamischen Größen sind im Wesentlichen

- der Lenkwinkel  $\delta_L$ ,
- die Lenkwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\delta}_L$ ,
- das Lenkmoment  $M_L$ ,
- die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{\text{CG}}$ ,
- die Querbeschleunigung  $v a_y$ ,
- die Gierrate  $\dot{\psi}$  und
- der Schwimmwinkel  $\beta$ .

Die sich aus der Umfeldsensorik ergebenden Größen sind

- die Fahrspurbreite  $b_S$ ,
- die Fahrspurkrümmung  $\kappa_S$ ,
- die Fahrspurkrümmungsänderung  $\dot{\kappa}_S$ ,
- die Querabweichung in der Fahrspur  $\tilde{y}$ ,
- die Querabweichungsänderung in der Fahrspur  $\dot{\tilde{y}}$ ,
- der relative Gierwinkel in der Fahrspur  $\tilde{\psi}$  und
- die relative Gierwinkeländerung in der Fahrspur  $\dot{\tilde{\psi}}$ .



Die Positionierung der Regelsolltrajektorie erfolgt in den meisten Anwendungsfällen in der Mitte der Fahrspur. Es existieren jedoch abweichende Ansätze – insbesondere bei hohen Krümmungsradien – zur Positionierung der Solltrajektorie. Wie beispielsweise in [Mitschke und Wallentowitz \(2004\)](#) dargestellt, tendiert der menschliche Fahrer mit abnehmendem Kurvenradius mehr und mehr dazu, die Kurve zu „schneiden“. Um dieses Verhalten auch in der Regelungsstrategie zu realisieren, ist die Sollspur in Abhängigkeit der Spurkrümmung  $\kappa_S$  zum Kurveninneren zu verschieben. Weiterhin haben [Ishada u. a. \(1999\)](#) gezeigt, dass die durchschnittliche mittlere Spurabweichung  $\tilde{y} = 0,05$  m beträgt. Dies kann ebenfalls in der Regelung berücksichtigt oder mit einer adaptiven Modellparametrierung fahrerindividuell abgestimmt werden.

Die Regelaufgabe besteht demnach darin, die Querabweichung  $\tilde{y}$  und die Winkelabweichung  $\tilde{\psi}$  zu minimieren. Algorithmen zur Berechnung eines geeigneten Lenkwinkels sollen nun vorgestellt werden.

### 4.3 Lenkwinkelregelung für den Bahnführungsassistenten

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Ansätze zur Realisierung der Lenkwinkelbestimmung für den Bahnführungsassistenten verglichen. Zum einen der potentialfeldbasierte Algorithmus nach [Switkes \(2006\)](#) und [Brandt u. a. \(2008\)](#), zum anderen ein kaskadierter Regelansatz nach [Müller \(2006\)](#). Zunächst werden die Algorithmen und deren Gesamtübertragungsfunktionen detailliert beschrieben.

#### 4.3.1 Potentialfeldbasierte Lenkwinkelbestimmung

In Abbildung 4.6 wird die grundlegende Reglerstruktur des potentialfeldbasierten Reglers als Blockschaltdiagramm dargestellt. Die Systemeingangsgrößen sind die aktuelle Fahrspurkrümmung  $\kappa_S$ , die Sollposition in Querrichtung  $y_{\text{soll}}$  sowie die Sollorientierung  $\psi_{\text{soll}}$ . Der Regler-Lenkradwinkel  $\delta_{L,R}$  ergibt sich, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, aus der Summe des potentialfeldbasierten Anteils  $\delta_{L,PF}$ , dem Vorsteuerungswinkel auf Basis der Spurkrümmung  $\delta_{L,V}$  und der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit  $v^{CG}$  zu

$$\delta_{L,R} = \delta_{L,PF} + \delta_{L,V}. \quad (4.47)$$

Mit dem Gesamtreglerverstärkungsfaktor  $k_p$ , der virtuellen Vorausschaudistanz

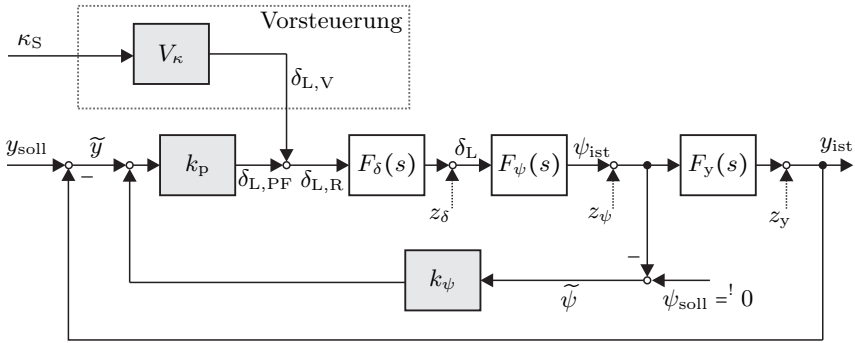


Abbildung 4.6: Blockschaltbild des potentialfeldbasierten Bahnfolgereglers in Anlehnung an [Switkes \(2006\)](#)

$k_\psi$  und der Vorsteuerungs-Übertragungsfunktion

$$V_\kappa(v^{\text{CG}}) = \frac{\delta_{L,V}}{\kappa_S} = l + EG(v^{\text{CG}})^2 \quad (4.48)$$

ergibt sich der Gesamtreglerlenkgradwinkel zu

$$\delta_{L,R} = \frac{2k_P(\tilde{y} + k_\psi\tilde{\psi})}{c_\alpha^v} + V_\kappa\kappa_S. \quad (4.49)$$

Im Vorsteuerungsanteil wird der – bei einer bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{\text{CG}}$  – benötigte Lenkwinkel, um eine Kurve der Krümmung  $\kappa_S$  im stationären Fall zu durchfahren, berechnet. Hierzu liegen

$$\delta_{L,V} = \delta_A + EG_V a_y^{\text{CG}}, \quad (4.50)$$

$$\delta_A = l\kappa_S \quad (4.51)$$

$$\text{und } {}_V a_y^{\text{CG}} = (v^{\text{CG}})^2 \kappa_S \quad (4.52)$$

zugrunde. Der Parameter  $k_\psi$  kann für die Gewichtung zwischen Winkel- und Querabweichung genutzt werden, während der Gesamtverstärkungsfaktor  $k_P$  die Übersetzung der Regelfehler auf den Bahnführungsassistent-Reglerlenkwinkel realisiert. Die Gesamtübertragungsfunktion  $F_{y,\text{PF}}(s) = \frac{y_{\text{ist}}}{y_{\text{soll}}}$  ergibt mit der Lenk-

systemübertragungsfunktion  $F_\delta$  und den bereits in Abschnitt 4.1 hergeleiteten Übertragungsfunktionen des linearen Einspurmodells zu

$$F_{y,\text{PF}}(s) = \frac{y_{\text{ist}}}{y_{\text{soll}}} = \frac{2k_p F_\delta F_\psi F_y}{c_\alpha^v + 2k_p F_\delta F_\psi F_y + 2k_p F_\delta F_\psi}. \quad (4.53)$$

Für die Übertragungsfunktion der elektrischen Servolenkung  $F_\delta$  wird näherungsweise *PT1*-Übertragungsverhalten vorausgesetzt, so dass sich

$$F_\delta(s) = \frac{1}{1 + sT_\delta} \quad (4.54)$$

ergibt. Für die innere Winkelregelung – also der Übertragung der Sollorientierung  $\psi_{\text{soll}}$  auf die Istorientierung  $\psi_{\text{ist}}$  – ergibt sich die Übertragungsfunktion zu

$$F_{\psi,\text{PF}}(s) = \frac{\psi_{\text{ist}}}{\psi_{\text{soll}}} = \frac{2 \frac{k_p}{c_\alpha^v} k_\psi F_\delta F_\psi}{1 + 2 \frac{k_p}{c_\alpha^v} k_\psi F_\delta F_\psi}. \quad (4.55)$$

Um das Störübertragungsverhalten bzw. die Robustheit des geregelten Systems beurteilen zu können, sind im Folgenden die Störübertragungsfunktionen für eine Störung des Radlenkwinkels  $z_\delta$ , die Störung der Fahrzeugorientierung  $z_\psi$  und der Querposition  $z_y$  herzuleiten.

Die dynamische Auswirkung einer Störung des Radlenkwinkels auf die Querposition des Fahrzeugs ergibt sich zu

$$F_{z_\delta,\text{PF}}(s) = \frac{y_{\text{ist}}}{z_\delta} = \frac{F_\psi F_y}{1 + 2 \frac{k_p}{c_\alpha^v} F_\delta F_\psi (k_\psi + F_y)}. \quad (4.56)$$

Die Störübertragung in der Fahrzeugorientierung lässt sich mit

$$F_{z_\psi}(s) = \frac{y_{\text{ist}}}{z_\psi} = \frac{F_y}{1 + 2 \frac{k_p}{c_\alpha^v} F_\delta F_\psi (k_\psi + F_y)} \quad (4.57)$$

darstellen. Wird das Fahrzeug beispielsweise durch Windeinfluss oder Querneigung der Straßenoberfläche in der Querposition versetzt bzw. gestört, können die Auswirkungen durch die Übertragungsfunktion

$$F_{z_y}(s) = \frac{y_{\text{ist}}}{z_y} = \frac{1 + k_\psi \frac{2k_p}{c_\alpha^v} F_\delta F_\psi}{1 + \frac{2k_p}{c_\alpha^v} F_\delta F_\psi (k_\psi + F_y)} \quad (4.58)$$

beschrieben werden.

### 4.3.2 Kaskadierte Regelung

Eine kaskadierte Regelung kann nach [Lunze \(2010\)](#) zur Regelung eines *SISO*-Systems<sup>5</sup> verwendet werden. Das globale Regelungsziel – also die äußere Regelkaskade – für die Anwendung in einem Bahnführungsassistentensystem ist die Position des Fahrzeugschwerpunktes in Querrichtung zur Fahrbahn im fahrbahnfesten Führungskoordinatensystem.

Die innere Kaskade bildet die Regelung der Fahrzeugorientierung relativ zur Straßenorientierung. Diese wird genutzt, um das globale Regelungsziel zu erreichen. Die Regelungsstruktur stellt sich wie in [Abbildung 4.7](#) gezeigt dar, wobei  $R_y(s)$  die Querabweichungsreglerdynamik und  $R_\psi(s)$  die Orientierungsabweichungsreglerdynamik ist. Der Orientierungswinkelregler der inneren Kaskade kann, wie

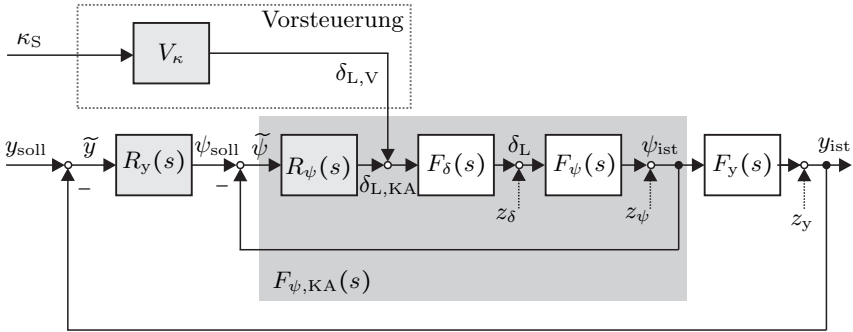


Abbildung 4.7: Blockschaltbild des kaskadierten Bahnführungsreglers in Anlehnung an [Müller \(2006\)](#)

beispielsweise in [Müller \(2006\)](#) gezeigt, durch einen *PIDT1*-Regler mit

$$R_\psi(s) = K_{P_\psi} \frac{1 + sT_{V_\psi}}{1 + sT_{1_\psi}} + K_{I_\psi} \frac{1}{s} \quad (4.59)$$

abgebildet werden. Die proportionalen Faktoren vor dem *PDT1*-Anteil  $K_{P_\psi}$  und vor dem integralen *I*-Anteil  $K_{I_\psi}$  können dynamisch mit

$$K_{i_\psi} = k_{i_\psi} \frac{\left[ \frac{\dot{\psi}}{\delta} \right]_{\text{stat}}}{\left[ \frac{\psi}{\delta} \right]_{\text{stat}}} \bigg|_{v^{\text{CG}} = v_{\text{ch}}^{\text{CG}}} \text{ mit } i = \{P, I\} \quad (4.60)$$

<sup>5</sup> *SISO*: Single Input Single Output.

angepasst werden. Die geschwindigkeitsabhängige Adaption der Zeitkonstante  $T_{V\psi}$  erfolgt mit

$$T_{V\psi} = T_{1\psi} + \frac{K_{D\psi}}{K_{P\psi}}. \quad (4.61)$$

In der äußeren Kaskade kann der Querpositions-Regler beispielsweise mit einem *PDT1*-Ansatz zu

$$R_y(s) = K_{Py} \frac{1 + sT_{Vy}}{1 + sT_{1y}} \quad (4.62)$$

realisiert werden, wobei der proportionale Faktor geschwindigkeitsabhängig durch

$$K_{Py} = \frac{\pi}{180} \left[ k_{Py} \frac{1}{v_{CG}} + k_{Py0} \right] \quad (4.63)$$

adaptiert wird. Die geschwindigkeitsabhängige Adaption der Zeitkonstanten  $T_{Vy}$  kann mit

$$T_{Vy} = T_{1y} + \frac{K_{Dy}}{K_{Py}} \quad (4.64)$$

erfolgen. Die Sollwert-Übertragungsfunktion der inneren Kaskade im Frequenzbereich ergibt sich zu

$$F_{\psi,KA}(s) = \left[ \frac{\psi_{ist}}{\psi_{soll}} \right] = \frac{R_\psi(s)F_\delta(s)F_\psi(s)}{1 + R_\psi(s)F_\delta(s)F_\psi(s)}. \quad (4.65)$$

Für den Gesamtregelkreis ergibt sich dann die Sollwertübertragungsfunktion zu

$$F_{y,KA}(s) = \left[ \frac{y_{ist}}{y_{soll}} \right] = \frac{R_y(s)F_{\psi,KA}(s)F_y(s)}{1 + R_y(s)F_{\psi,KA}(s)F_y(s)}. \quad (4.66)$$

Die Störübertragungsfunktion für eine Radlenkwinkelstörung kann zu

$$F_{z\delta,KA}(s) = \left[ \frac{y_{ist}}{z_\delta} \right] = \frac{F_\psi(s)F_y(s)}{1 + R_\psi(s)F_\delta(s)F_\psi(s)(1 + R_y(s)F_y(s))} \quad (4.67)$$

hergeleitet werden. Wird die Orientierung des Fahrzeugs  $\psi_{ist}$  durch externe Einflüsse gestört, kann die dynamische Auswirkung mit

$$F_{z\psi,KA}(s) = \left[ \frac{y_{ist}}{z_\psi} \right] = \frac{F_y(s)}{1 + F_\psi(s)F_\delta(s)R_\psi(s)(1 + R_y(s)F_y(s))} \quad (4.68)$$

charakterisiert werden. Eine Störung der Querposition  $y_{\text{ist}}$  des Fahrzeugs kann beispielsweise durch Seitenwind oder eine Straße mit starker Querneigung hervorgerufen werden. Der Einfluss einer derartigen Störung auf das System wird durch

$$F_{zy,KA}(s) = \frac{y_{\text{ist}}}{z_y} = \frac{1}{1 + R_y(s)F_{\psi,KA}(s)F_y(s)} \quad (4.69)$$

charakterisiert. Um die Dynamik der Regelstrecke im BODE-Diagramm zu untersuchen, wird die Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises zu

$$F_{y0,KA}(s) = R_y(s)F_{\psi,KA}(s)F_y(s) \quad (4.70)$$

hergeleitet.

### 4.3.3 Bestimmung der optimalen Reglerparameter

Grundsätzlich bestehen nach [Lunze \(2010\)](#) verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung eines optimalen Reglerparametersatzes. Da der Spurhalterregler für eine sehr individuelle Aufgabe ausgelegt werden soll, wird hier die Methode der Parameteroptimierung mit einem klassischen, gradientenbasierten Optimierer und einer Gütefunktion verwendet. Als Testfunktion fungiert die HEAVISIDE-Funktion, auch Sprung- oder Einheits-sprungfunktion genannt. Die HEAVISIDE-Funktion hat für jedes beliebige negative Argument den Wert Null, für alle positiven Argumente – einschließlich der Null – den Wert eins. Somit ergibt sich

$$\Theta_H(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases}. \quad (4.71)$$

Physikalisch betrachtet wird der Eingang des geregelten Systems mit der Sprungfunktion beaufschlagt, dies bedeutet einen Sprung in der gewünschten Sollposition  $y_{\text{soll}}$  und somit auch in der Querabweichung  $\tilde{y}$  von 1 m. Bei den kaskadierten Regelansätzen wird zusätzlich ein Sprung in der inneren Kaskade als Testfunktion verwendet, dies entspricht einer unendlich schnellen Änderung von  $\psi_{\text{soll}}$  um  $1 \text{ rad} \approx 57,3 \text{ deg}$ .

Das Optimierungsziel besteht in diesem rein technisch/analytischen Ansatz zunächst darin

- möglichst kleine Abweichungen  $\tilde{y}$  zu jedem Zeitpunkt  $t_i$  und
- ein möglichst geringes Überspringen

zu realisieren. Zur Reduzierung der Systemkomplexität wird als Testszenario eine krümmungsfreie Strecke ( $\kappa_S = 0$ ) gewählt. Weiterhin wird für die Querabweichung näherungsweise  $\tilde{y} \approx y_{\text{soll}} - y_{\text{ist}}$  und für die Winkelabweichung  $\tilde{\psi} = \psi_S$  verwendet.

Das aus diesen Anforderungen abgeleitete Gütefunktional ergibt sich zu

$$J = k_{b,1} k_1 \int_0^{t_{\text{end}}} (\tilde{y}(t)^T \tilde{y}(t)) dt + k_{b,2} (\tilde{y}_{\text{max}})^2. \quad (4.72)$$

Bei dieser Mehrzieloptimierung werden Terme verschiedener Größenordnungen verarbeitet. Die Faktoren  $k_{b,i}$  mit  $i \in \{1, 2\}$  dienen dazu, die Einzelterme zunächst so zu skalieren, dass sie in der gleichen Größenordnung liegen. Als Basis soll möglichst die Skalierung der Einzelterme auf eins angestrebt werden. Für das Integral über die quadratische Querabweichung wird eine mittlere Abweichung von  $\tilde{y} = 0, 1$  m zugrunde gelegt. Somit ergibt sich

$$k_{b,1} = \frac{1}{0,01 \int_0^{t_{\text{end}}} 1 dt}. \quad (4.73)$$

Für den Faktor  $k_{b,1}$  – anschaulich die Höhe des Überschwingens beim Spurwechsel – wird ein durchschnittliches maximales Überschwingen von  $\tilde{y}_{\text{max}} = 0,5$  m angesetzt. Es ergibt sich somit

$$k_{b,2} = \frac{1}{0,25}. \quad (4.74)$$

Der Faktor  $k_1$  kann genutzt werden, um das relative Optimierungsziel zu verändern. So kann beispielsweise das Hauptoptimierungsziel auf eine möglichst gute Sollwertfolge oder alternativ vorrangig auf ein möglichst geringes Überschwingen gelegt werden, wobei der Einfluss der sekundären Optimierungsziele über die Faktoren eingestellt werden kann.

Für die Optimierung wird der Zeitraum für den Spurwechsel auf  $t = 20$  s festgelegt. Da sowohl für den potentialfeldbasierten Bahnführungsregler als auch für den proportionalen, kaskadierten Regler lediglich zwei Reglerparameter benötigt werden, ist die Verwendung des gradientenbasierten NELDER-MEAD-Algorithmus nach [Nelder und Mead \(1965\)](#) ausreichend. Der NELDER-MEAD-Algorithmus basiert auf einer Direct Search Simplex-Methode und wird zur Optimierung nichtlinearer Funktionen verwendet. Die Besonderheit des Algorithmus liegt darin, dass dieser ohne Ableitungen der Funktion nach den Parametern anwendbar ist. Die Konvergenz des Verfahrens ist zwar vergleichsweise langsam, jedoch sehr robust. Die NELDER-MEAD-Methode ist als Funktion `fminsearch` in der MATLAB Opti-

mization Toolbox verfügbar. Die Startwerte für die Optimierung werden durch plausible Annahmen gewählt.

### Optimierung der Parameter des potentialfeldbasierten Reglers

Die Optimierung der Parameter wird für das Fahrzeuggeschwindigkeitsintervall  $[40, 180] \frac{\text{km}}{\text{h}}$  durchgeführt, da dieses der angestrebte Einsatzbereich des Bahnführungsreglers ist. Die auf Basis der Gütefunktion ermittelten optimalen Reglerparameter in Abhängigkeit der Geschwindigkeit werden in Abbildung 4.8 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Vorausschaulänge  $k_\psi$  stetig mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit von ca. 18 m bei  $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  auf 60 m bei  $180 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  steigt. Dies entspricht auch dem menschlichen Verhalten bei der Fahrzeugführungsaufgabe. Der Verlauf des proportionalen Verstärkungsfaktors  $k_p$  fällt zunächst bis zur charakteristischen Geschwindigkeit ab, steigt dann wieder etwas und verringert sich bei sehr großen Geschwindigkeiten erneut.

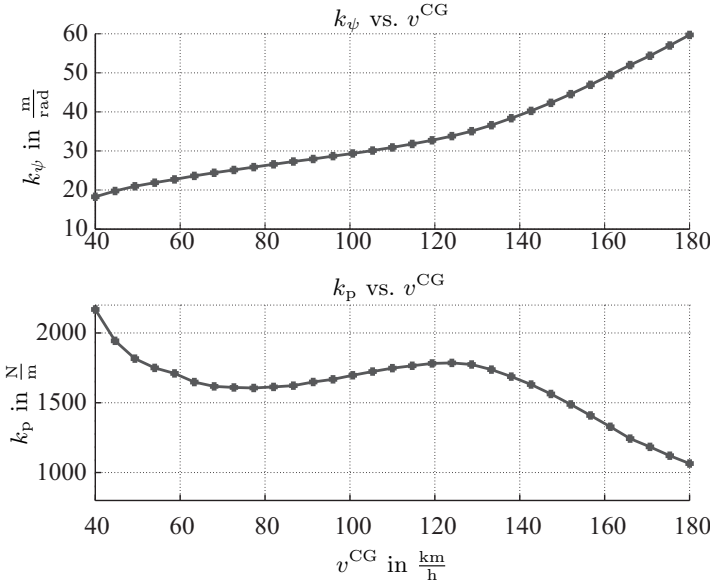


Abbildung 4.8: Optimale Reglerparameter des potentialfeldbasierten Reglers in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit



#### 4.3.4 Vergleich der Regelansätze

Im Folgenden sollen ausgewählte Ergebnisse der hergeleiteten und parametrisierten Regler verglichen werden. Für die Analysen werden die Fahrzeugparameter nach Tabelle A.2 und die optimierten Reglerparameter nach Tabelle A.3 verwendet. Für die Tests wird eine Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{CG} = 40 \frac{m}{s} = 144 \frac{km}{h}$  festgelegt, welche einer für den Einsatzbereich des Bahnführungsassistenten repräsentativen Geschwindigkeit entspricht. In Abbildung 4.9 werden die Sprungantworten für einen Sprung in der Sollspur von 1 m in Querrichtung dargestellt. In dem betrachteten Zeitraum von 5 s kann für beide Regler ein stabiles Gesamtübertragungsverhalten beobachtet werden. Die sprunghaft geänderte Sollspur wird schnell eingeregelt.

Der potentialfeldbasierte Regler erreicht 95 % des Endwertes innerhalb von 2,26 s, der kaskadierte Regler benötigt hingegen 3,82 Sekunden, um diesen Wert zu erreichen. Es kann gefolgert werden, dass der potentialfeldbasierte Regler durch die optimale geschwindigkeitsabhängige Parametrierung sogar eine bessere Reglerqualität als der – aufgrund der hohen Parameteranzahl – komplexere kaskadierte Regler erreicht.

In Abbildung 4.10 sind die Reaktionen der beiden Regler auf eine Störung in der Querposition von 1 m gezeigt. Beide Regler sind in der Lage, die Störung in angemessener Zeit auszuregeln.

### 4.4 Integration von Fahrermodellen in den Gesamtregelkreis

Im Folgenden wird der betrachtete Regelkreis durch einen virtuellen Fahrer ergänzt. Die Modellierung des menschlichen Fahrers ist eine komplexe Aufgabe.

Die Art und Komplexität der Modellierung des Fahrers hängt stark vom individuellen Anwendungsfall ab. Im Bereich der Fahrzeugquerführung können die in der Literatur bekannten Modelle grundsätzlich in technisch orientierte Fahrermodelle und psychologisch motivierte Fahrermodelle eingeteilt werden. Fahrermodelle werden meist ausschließlich zur Bestimmung des Lenkwinkels verwendet, wohingegen Fahrermodelle das menschliche Verhalten während der Fahraufgabe abbilden sollen. Die Herausforderung bei der Erstellung eines Fahrermodells liegt nach Jürgensohn (1997) in der Modellierung des menschlichen Handelns. Genau

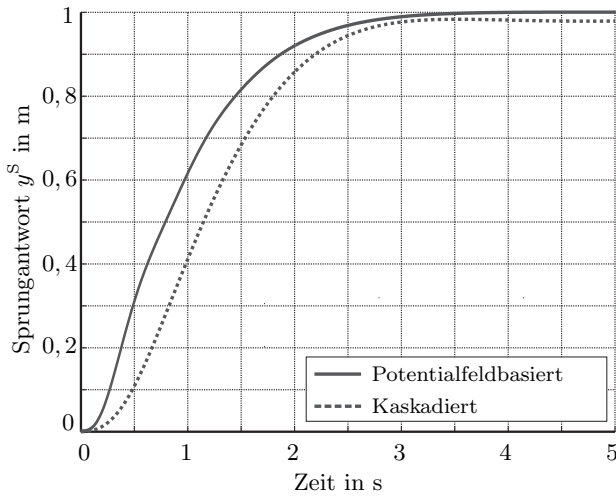


Abbildung 4.9: Sprungantwort des potentialfeldbasierten und kaskadierten Bahnführungsreglers im Vergleich

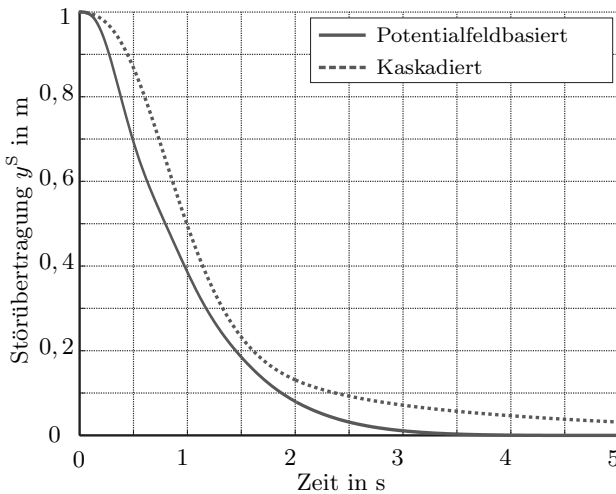


Abbildung 4.10: Störübertragung des potentialfeldbasierten und kaskadierten Bahnführungsreglers im Vergleich

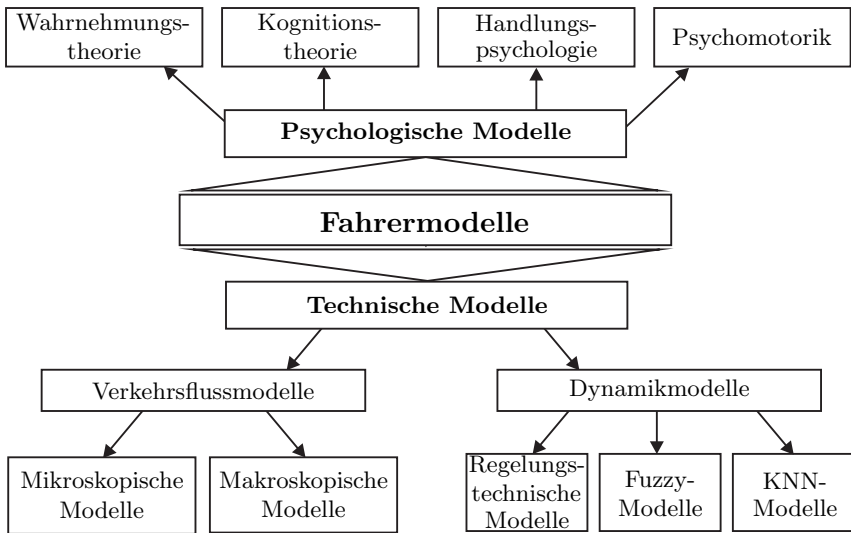


Abbildung 4.11: Fahrermodellkategorien

dies ist nur eingeschränkt mit den klassischen, technischen Modellierungsmethoden möglich. Nach [Huang \(2003\)](#) kann der Mensch nicht mit statischen Parametern modelliert werden, da sich sein Verhalten in Abhängigkeit von der Aufmerksamkeit, dem psychologischen Zustand und auch situationsabhängig ändert, wie beispielsweise im Affekt. [Jürgensohn \(1997\)](#) argumentiert, dass ein Fahrmodell oftmals wie ein Lenkroboter und nicht wie ein menschlicher Fahrer agiert. In [Abbildung 4.11](#) wird ein grundsätzlicher Überblick der in der Literatur bekannten Kategorien der psychologischen und technischen Fahrermodelle gegeben.

#### 4.4.1 Psychologische Fahrermodelle

Bei den psychologischen Modellen werden die Wahrnehmungstheorie, die Kognitionstheorie, die Handlungspsychologie und die Psychomotorik unterschieden. Die Wahrnehmungstheorie befasst sich mit der Lehre über die menschlichen Sensoren. Für die Fahraufgabe sind die haptische, vestibuläre (Gleichgewichtssinn) und auditive (Hörsinn) Wahrnehmung von entscheidender Bedeutung. Die haptische Wahrnehmung unterteilt sich in die kinestetische Wahrnehmung, welche die haptischen Reize über die Muskeln und Gelenke beschreibt, und die takti-

le Wahrnehmung, welche beispielsweise die haptische Interaktion der Haut mit Oberflächen definiert.

Nach [Huang \(2003\)](#) werden 90 % der für die Fahraufgabe relevanten Informationen visuell wahrgenommen. Der haptische Kanal hat jedoch Vorteile im Hinblick auf die Reaktionszeiten. Nach [Schieben u. a. \(2008\)](#) wird die Totzeit um den Faktor zwei im Vergleich zur visuellen Wahrnehmung reduziert.

Die Kognitionstheorie beschreibt die mentalen Prozesse und Strukturen, durch welche die zuvor aufgenommenen Eindrücke und Informationen verarbeitet werden. Die Fahrsituation wird durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die sowohl durch die Umwelt als auch durch das Fahrzeug entstehen können, bestimmt.

Die Handlungspsychologie umfasst nach [Jürgensohn \(1997\)](#) die Beziehung zwischen der Fahrerintention und des resultierenden Handelns. Weiterhin sind somit die Entscheidungstheorie, die Motivationstheorie und die Methoden der künstlichen Intelligenz zu berücksichtigen.

Die Psychomotorik beinhaltet den menschlichen Antriebsmechanismus bzw. die Interaktion der menschlichen Akteure mit der Umwelt. Das CROSSOVER-Modell von [Jürgensohn \(1997\)](#) beschreibt im Speziellen die Anpassungsfähigkeit des Menschen auf zeitvariante dynamische Systeme.

#### 4.4.2 Technische Fahrermodelle

Die technischen, quantitativen Modelle beschreiben den Fahrer durch mathematisch motivierte Ansätze und Methoden der klassischen Regelungstheorie. Derartige Modelle lassen sich zur Beschreibung und Optimierung von

- Verkehrssimulationen,
- Fahrzeugsicherheitssystemen,
- Fahrerassistenzsystemen,
- Lebensdaueruntersuchungen und
- Fahrdynamiksimulationen

einsetzen. [Willumeit und Jürgensohn \(1997\)](#) gliedert die Modelle in Dynamik- und Verkehrsflussmodelle. Dynamische Fahrermodelle simulieren das dynamische Verhalten des Menschen in Abhängigkeit der Fahrzeugdynamik und der Fahrsituation. Dabei kann grundsätzlich zwischen Fahrermodellen für die Längs- und

Querdynamik unterschieden werden. Als mathematische Modellierungsansätze können beispielsweise

- regelungstechnische Ansätze,
- Fuzzy-Logic-basierte Strategien,
- künstliche neuronale Netze und
- hybride Modelle

zum Einsatz kommen. Im Folgenden werden einige Fahrermodelle zur Beschreibung der Querdynamikregelung beschrieben.

### Kompensatorische Fahrermodelle

Der Fahrer kann mit seinem visuellen Sinn die Quer- und Winkelabweichung in der Fahrspur, die Straßenkrümmung und auch die Straßenkrümmungsänderung wahrnehmen. Kompensatorische Fahrermodelle nutzen diese Informationen, um den Lenkwinkel zu bestimmen, der das Fahrzeug entlang der Solltrajektorie führt. Im Folgenden werden verschiedene kompensatorische Fahrermodelle aufgezeigt.

### PID-Fahrermodell

Im Fahrermodell nach [Iguchi \(1959\)](#) wird ausschließlich die laterale Abweichung in der Fahrspur als Regelgröße verwendet. Somit ist es notwendig, eine komplexe Reglerparameteridentifikation durchzuführen, um zufriedenstellende Regelungsergebnisse zu erhalten. Diese Methode berücksichtigt keinerlei menschliche Situationsadaption. Die Reglerübertragungsfunktion – also die Übertragung von Querabweichung  $\tilde{y}$  zu Fahrerlenkwinkel  $\delta_L$  – wird mit dem differentiellen Anteil  $K_{D,IG}$ , dem proportionalen Anteil  $K_{P,IG}$  und dem integralen Anteil  $K_{I,IG}$  zu

$$F_{IG}(s) = \frac{K_{D,IG}s^2 + K_{P,IG}s + K_{I,IG}}{s} \quad (4.75)$$

berechnet.

## PID-Fahrermodell mit menschlichen Faktoren

Das Fahrermodell nach [Ashkens und McRuer \(1962\)](#) erweitert das klassische PID-Modell um die menschliche Reaktionszeit. So führt Ashkens die kognitive Fahrerverzögerung  $t_{\text{cog}}$  und die motorische Verzögerung  $t_{\text{mot}}$  ein. Mit der proportionalen Verstärkung  $K_{\text{er,AS}}$ , welche die Fahrerfahrung beschreiben soll, und der Führungskonstanten  $T_{\text{L,AS}}$  und  $T_{\text{I,AS}}$  ergibt sich die Reglerübertragungsfunktion zu

$$F_{\text{AS}}(s) = \frac{K_{\text{er,AS}} e^{t_{\text{cog}} s} (1 + T_{\text{L,AS}})}{(1 + t_{\text{mot}})(1 + T_{\text{I,AS}} s)}. \quad (4.76)$$

## Prädiktive Fahrermodelle

Nach Kondo wird die Regelgüte und -stabilität durch die Extrapolation der zukünftigen Fahrzeugtrajektorie verbessert. Dazu wird ein virtueller Referenzpunkt in einer zuvor definierten Vorausschaudistanz bestimmt, indem – wie in [Abbildung 4.12](#) gezeigt – der Schnittpunkt der Solltrajektorie mit der virtuellen Vorausschau gebildet wird. Das Regelziel besteht dann in der Minimierung der Querabweichung für den virtuellen Referenzpunkt.

Das ebenfalls auf der Vorausschaustrategie basierende Fahrermodell nach [Renski \(2001\)](#) enthält zusätzlich einen Vorsteuerungsanteil, der auf der Fahrbahngeome-

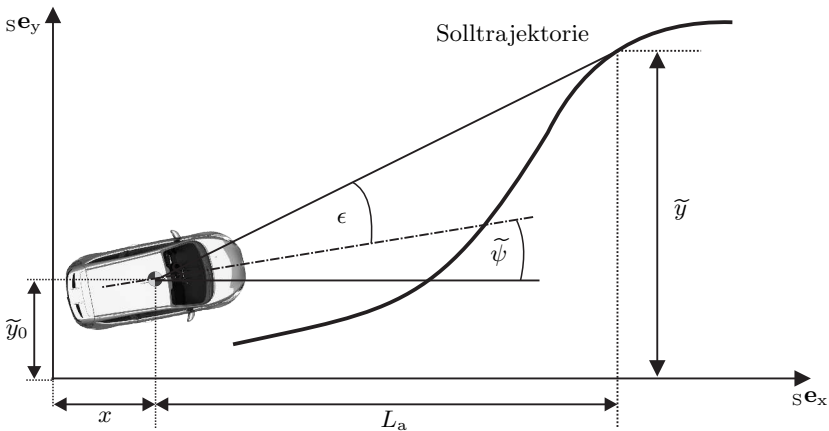


Abbildung 4.12: Extrapolation der Fahrzeugtrajektorie nach [Renski \(2001\)](#)

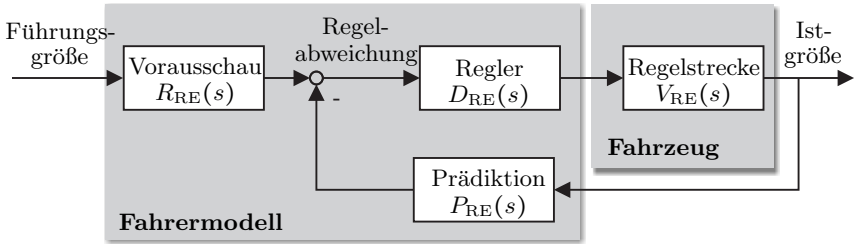


Abbildung 4.13: Struktur des vorausschauenden Reglers nach Renski (2001)

trie basiert, sowie einen kompensatorischen Anteil, um die menschlichen Totzeiten zu modellieren. Die Gesamtstruktur wird in Abbildung 4.13 gezeigt.

Der geregelte Lenkwinkel setzt sich aus dem Vorsteuerungs-, dem Prädiktions- und dem Kompensationsanteil mit der Vorausschaustrategie  $R_{RE}$ , der Reglerfunktion  $D_{RE}$ , der Prädiktionsfunktion  $P_{RE}$ , der Fahrzeugübertragungsfunktion  $V_{RE}$ , der Vorausschaudistanz  $L_a$ , der Reaktionszeit  $T_k$  und der Lenkverstärkung  $W$  zu

$$\delta_{RE} = \frac{W}{L_a} \tilde{y}(t + \frac{L_a}{v_{CG}} - T_k) + \frac{W}{L_a} \tilde{y}_0(t - T_k) - W\epsilon(t - T_k) \quad (4.77)$$

zusammen.

### Antizipatorische Fahrermodelle

Eine weitere Kategorie der kompensatorischen Modelle sind die antizipatorischen Modelle. Nach Dinges und Naab (1996) ist das Fahren keine reine Regelungsaufgabe. Die menschliche Antizipation ermöglicht die Abschätzung zukünftiger Fahrsituationen, da der Fahrer auf die Wissensbasis bezüglich des dynamischen Verhaltens des Fahrzeugs zugreifen kann. Somit agiert der Fahrer zu einem gewissen Anteil rein steuernd, basierend auf vergangenen Erfahrungen. Die Strategie kann somit, wie in Abbildung 4.14 dargestellt, in die Bahnführungs- und die Stabilisierungsebene gegliedert werden. Der resultierende Fahrerlenkwinkel ergibt sich mit dem Schwimmwinkel  $\beta$ , der Gierrate  $\dot{\psi}$ , der Straßenkrümmung  $\kappa_s$ , der Querabweichung  $\tilde{y}$ , der Winkelabweichung  $\tilde{\psi}$ , den kognitiven Verzögerungen  $T_1$

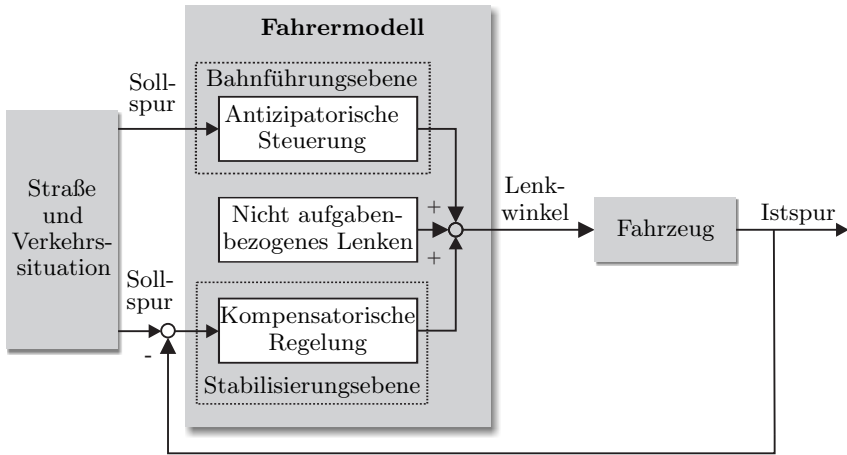


Abbildung 4.14: Zweiebenenmodell nach Donges und Naab (1996)

und  $T_V$ , der Totzeit  $\tau_t$ , dem menschlichen Rauschen  $\bar{\eta}$  und den Reglerparametern  $k_{DO,i}$ ,  $i = \{1, 2, 3, 4, 5\}$  mit

$$\bar{\delta}_h = k_{DO,1}\beta + k_{DO,2}\dot{\tilde{\psi}} + k_{DO,3}\tilde{\psi} + k_{DO,4}\tilde{y} + k_{DO,5}\kappa_S \quad (4.78)$$

zu

$$\delta_{DO} = \frac{1 + sT_V}{1 + sT_1} e^{-s\tau_T} (\bar{\delta}_h + \bar{\eta}). \quad (4.79)$$

### Fahrermodelle basierend auf der Fuzzy-Logic Methode

Nach Wolter u. a. (1997) können die Fahrertzustände bzw. das Handeln des Fahrers nicht exakt beschrieben werden. Eine Möglichkeit der unscharfen Beschreibung der Fahrertzustände ist die Fuzzy-Logic. Ein Überblick der Fuzzy-Logic als Anwendung für einen innovativen Spurwechselassistenten wird in Abschnitt 4.6.1 gegeben. Wolter u. a. (1997) schlagen als Systemeingänge die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{CG}$  und die Fahrbahnkrümmung  $\kappa_S$  vor.



## Fahrermodelle mit neuronalen Netzwerken

Die bislang beschriebenen Modelle sind reine Ein-/Ausgangmodelle, die den Fahrer als Regler beschreiben. Der Fahrer reagiert somit direkt auf die Systemeingänge. Aus psychologischer Sicht reagiert der Mensch nach [Jürgensohn \(1997\)](#) jedoch auf den Informationsfluss bzw. den Verlauf der vergangenen Reize.

Ein Modellierungsansatz, um dieser menschlichen Eigenschaft gerecht zu werden, ist der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen. Die Gesamtreaktion des menschlichen Systems ist eine Folge aus vielen autonom agierenden Neuronen<sup>6</sup>. Die Übertragung ist durch einen variablen, sich durch autonomes Lernen adaptierenden Parametersatz beschrieben. Die Beschreibung der gesamten Fahrsituation resultiert also aus der Summe aller Umwelt- und Fahreigenschaften sowie deren Historie.

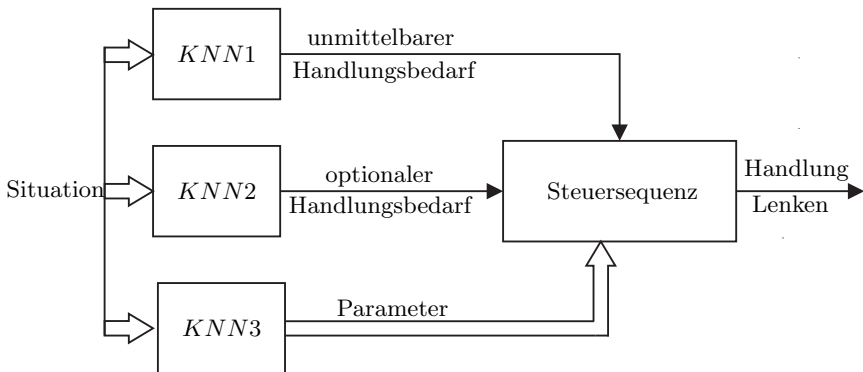


Abbildung 4.15: Auf neuronalen Netzen basierendes Fahrermodell nach [Jürgensohn \(1997\)](#)

Als Beispiel kann die Querregelung des Fahrzeugs, wie in [Abbildung 4.15](#) gezeigt, durch drei neuronale Netze beschrieben werden. Die menschliche Regelung ist das Resultat der Summe diskreter Regeleingriffe, wobei die neuronalen Parameter intern adaptiert werden.  $KNN1$  repräsentiert die Approximation des unmittelbaren Handlungsbedarfs. Dies könnte beispielsweise die Zeit bis zum Spurverlassen  $TLC$  sein.  $KNN2$  ist ein optionaler Handlungspfad, der beispielsweise von der

<sup>6</sup>Eine Nervenzelle oder ein Neuron ist eine auf Erregungsleitung spezialisierte menschliche Zelle.

Querabweichung  $\tilde{y}$  und von dem Querabweichungsgradient  $\dot{\tilde{y}}$  abhängt. Das neuronale Netz *KNN3* ist für die interne Echtzeit-Parametrierung zuständig.

## Hybride Fahrermodelle

Nach [Kiencke und Nielsen \(2005\)](#) ist es nicht möglich, jede Fahrsituation mit nur einem Modell zu beschreiben. Das Gesamtfahrermodell muss in der Lage sein, diverse Aufgaben parallel zu beschreiben. So etablierten [Kiencke und Nielsen \(2005\)](#) ein hybrides Fahrermodell für die Längs- und Querregelung. Die verschiedenen Fahrerhandlungen werden dann mit der Warteschlangentheorie kombiniert. Zusätzlich dazu wird ein kognitiver Filter zur Limitierung der Handlungsgeschwindigkeit eingesetzt. Ergänzend dazu sind die Handlungen zu priorisieren. Zur Realisierung dieser Anforderung sollen verschiedene Regelungskonzepte, von klassischen Methoden bis hin zur Fuzzy-Logic, zum Einsatz kommen.

### 4.4.3 Analyse ausgewählter Fahrermodelle

Drei der technischen Fahrermodelle –

- das einfache kompensatorische Modell nach [Iguchi \(1959\)](#),
- das vorausschauend agierende Renski-Modell nach [Renski \(2001\)](#) und
- das antizipatorisch und kompensatorisch ausgelegte Fahrermodell mit Totzeiten und kognitiven Verzögerungen nach [Donges und Naab \(1996\)](#) –

werden im Folgenden implementiert und mit dem auch im Fahrsimulator verwendeten nichtlinearen Zweispurmodell (Parameter nach Tabelle A.2) und dem potentialfeldbasierten Bahnführungsassistentensystem nach [Brandt \(2008\)](#) (siehe dazu Abschnitt 4.3.1) evaluiert. Zu beachten ist hierbei, dass der Vorsteuerungsanteil des Reglers deaktiviert ist und die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{\text{CG}} = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  beträgt. In Abbildung 4.16 wird der Gesamtablauf für die Modellevaluierung dargestellt.

Der Fahrermodellvergleich wird für ein Spurwechselmanöver definiert, wobei die Solltrajektorie – also die Umwelt – durch eine Sigmoidfunktion<sup>7</sup> gebildet wird.

<sup>7</sup>Eine Sigmoidfunktion, Schwanenhalsfunktion oder S-Funktion ist eine mathematische Funktion mit einem S-förmigen Graphen.

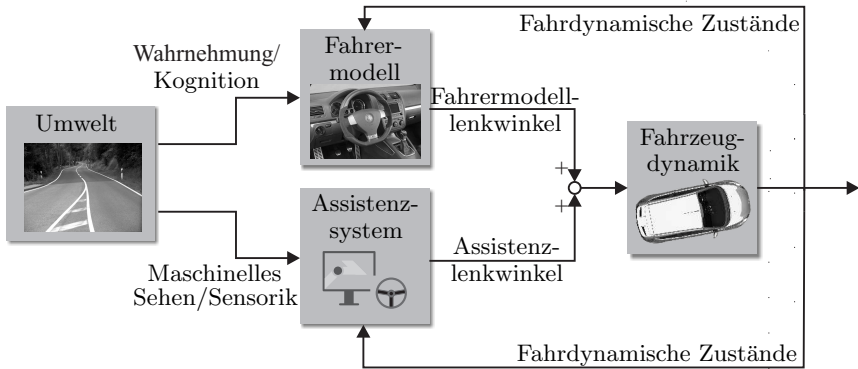


Abbildung 4.16: Fahrermodellevaluierung

Der vom Bahnführungsassistenten ermittelte Radlenkwinkel wird in dieser Analyse zum Fahrerlenkwinkel addiert. An dieser Stelle sei erwähnt, dass diese Strategie in Bezug auf das MMS bzw. die Kommunikation mit dem realen Fahrer nicht optimal ist. In [Brandt u. a. \(2008\)](#) hat sich gezeigt, dass die direkte Lenkwinkelüberlagerung zu einem indirekten und wenig intuitiven Lenkgefühl führt. In Kapitel 5 werden Ansätze vorgestellt, die der menschlichen Intuition gerecht werden.

Die Basis des hier nun quantitativen durchgeführten Fahrermodellvergleichs bildet eine Gütefunktion, die aus der Quadratsumme der lateralen Abweichung sowie der Winkelabweichung besteht.

### Spurwechseltrajektorie

Die Spurwechseltrajektorie wird durch eine Sigmoidfunktion definiert, die so parametrisiert ist, dass der Spurwechsel unabhängig von der Geschwindigkeit in fünf Sekunden vollständig abgeschlossen ist. Die Parameter des dazu verwendeten Polynoms neunter Ordnung  $a_i$ ,  $i = \{1, \dots, 9\}$ , werden so angepasst, dass sich ein glatter Verlauf für einen Spurwechsel um 3,5 m ergibt. Der zeit- bzw. wegabhängige Kurvenverlauf ergibt sich im ortsfesten Koordinatensystem mit

$$x_{\text{SIG}}(t) = v^{\text{CG}} t \quad (4.80)$$

$$(4.81)$$

zu

$$y_{\text{SIG}}(t) = a_{\text{S}9}t^9 + a_{\text{S}8}t^8 + a_{\text{S}7}t^7 + a_{\text{S}6}t^6 + a_{\text{S}5}t^5 + a_{\text{S}4}t^4 + a_{\text{S}3}t^3. \quad (4.82)$$

Die resultierende Trajektorienorientierung folgt dann zu

$$\psi_{\text{SIG}}(t) \approx \frac{\partial y_{\text{SIG}}}{\partial x_{\text{SIG}}} = \frac{\partial}{\partial t} y_{\text{SIG}}(t) = \quad (4.83)$$

$$9a_{\text{S}9}t^8 + 8a_{\text{S}8}t^7 + 7a_{\text{S}7}t^6 + 6a_{\text{S}6}t^5 + 5a_{\text{S}5}t^4 + 4a_{\text{S}4}t^3 + 3a_{\text{S}3}t^2. \quad (4.84)$$

Die Spurwechseltrajektorienverläufe in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v^{\text{CG}} = 50 - 150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  werden in Abbildung 4.17(a) gezeigt. Die zugehörigen kontinuierlich glatten Krümmungsverläufe in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit zeigt Abbildung 4.17(b). Eine weitere Methode zur Gestaltung von sigmoidförmigen Trajektorien wird beispielsweise in [Stählin u. a. \(2006\)](#) gezeigt.

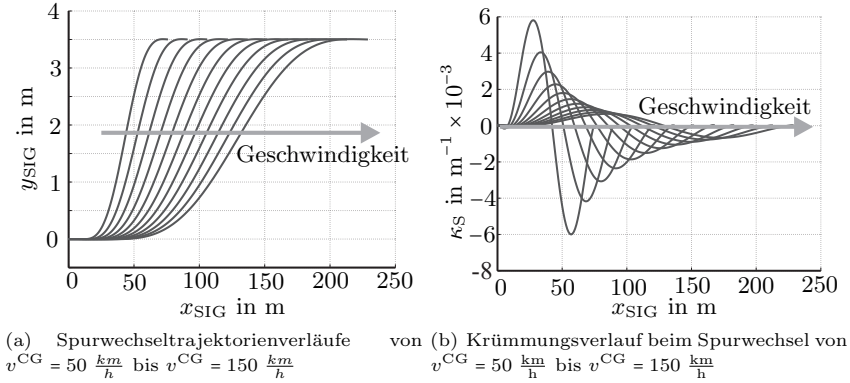


Abbildung 4.17: Spurwechseltrajektorien in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit

### Analyse der Fahrermodelle mit einem nichtlinearen Zweispurmodell

Im folgenden Abschnitt werden die drei ausgewählten Fahrermodelle in Kombination mit dem Bahnführungsassistentensystem analysiert. Zunächst wird dazu der aus den Fahrermodellen resultierende Fahrerlenkwinkel direkt am Reifen des

Fahrzeugmodells gestellt. In einem zweiten Schritt wird dann der virtuelle Fahrer von dem Bahnführungsassistenzsystem bei der Spurwechselaufgabe unterstützt, der gestellte Lenkwinkel  $\delta$  ist somit die Summe aus Assistenz- ( $\delta_{\text{Assist}}$ ) und Fahrerlenkwinkel ( $\delta_{\text{Fahrer}}$ ).

Im oberen Ergebnisplot werden jeweils die abgefahrenen Fahrzeugtrajektorien gezeigt, im unteren Plot werden jeweils die gestellten Lenkwinkel verglichen. Die in den Simulationen verwendeten Parameter sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. In Abbildung 4.18 werden oben die Solltrajektorie und die abgefahrenen Trajektorien für die Evaluierung des IGUCHI-Fahrermodells dargestellt.

Die Abweichung von der zuvor definierten Solltrajektorie ist bereits für den Fall, dass das Bahnführungsassistenzsystem ausgeschaltet ist, mit  $\tilde{y}_{\text{max}} = 0,035$  m äußerst gering. Da die menschlichen Verzögerungen und Totzeiten im IGUCHI-Modell nicht berücksichtigt werden, entspricht dieses Ergebnis den Erwartungen. Wird das Bahnführungsassistenzsystem aktiviert, zeigt sich, dass nur ein sehr kleiner Überlagerungswinkel ( $\delta_{\text{Assist,max}} = 0,08$  deg) gestellt wird. Mit  $\delta_L = i_L \delta$  ergibt sich ein maximaler Lenkradüberlagerungswinkel  $\delta_{L,\text{Assist,max}} = 1,256$  deg.

Die entsprechenden Ergebnisse für das RENSKI-Fahrermodell werden in Abbildung 4.19 präsentiert. Durch die vorausschauende Strategie im RENSKI-Fahrer-

Modell	Parameter	Wert
IGUCHI	$K_{D,\text{IG}}$	0,2
	$K_{P,\text{IG}}$	0,05
	$K_{I,\text{IG}}$	0,005
RENSKI	$L_a$	36,5
	$T_k$	0,4
	$W$	0,3
DONGES	$k_{\text{DO},1}$	0,01
	$k_{\text{DO},2}$	0,1
	$k_{\text{DO},3}$	0,1
	$k_{\text{DO},4}$	0,2
	$k_{\text{DO},5}$	1
	$T_V$	0,05
	$T_1$	0,05
	$\tau_T$	0,15
	$\bar{\eta}$	0

Tabelle 4.1: Fahrermodellparameter für die Modellevaluierung

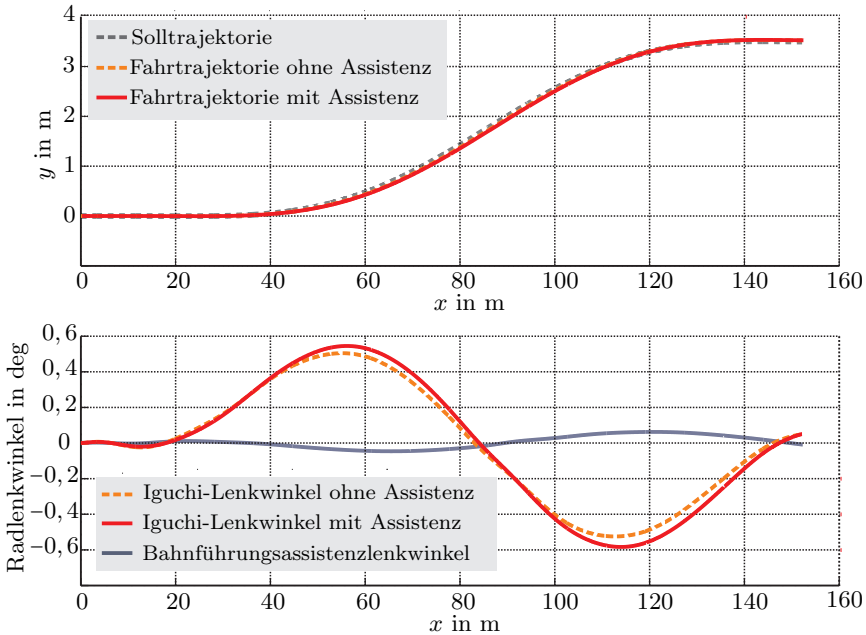


Abbildung 4.18: Iguchi-Fahrermodellevaluierung bei  $v^{\text{CG}} = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

modell sowie die modellierte Fahrerreaktionszeit zeigt sich, dass der virtuelle Fahrer die Kurve leicht „schneidet“ und ein geringer Phasenverzug zu erkennen ist. Durch die Aktivierung des Bahnführungsassistentensystems werden die Solltrajektorienfolge und das Überspringen reduziert und die Spurwechselgüte somit subjektiv verbessert. Der Fahrerlenkwinkel erreicht dabei ein Maximum von  $0,45 \text{ deg}$  bzw. ein Fahrerlenkgradwinkel von  $7,07 \text{ deg}$ . Der Assistenzsystemlenkgradwinkel ist mit  $\delta_{L, \text{Assist}, \text{max}} = 2,04 \text{ deg}$  deutlich größer als für das IGUCHI-Modell.

Von den im Rahmen dieser Arbeit verglichenen Fahrermodellen beinhaltet das Donges-Modell den höchsten Grad an menschlichen Modellierungsfaktoren. Die Resultate werden zusammenfassend in Abbildung 4.20 präsentiert. Beim Donges-Modell zeigt sich das Kurvenschneiden noch ausgeprägter.

Die Sollwertfolge kann durch den Einsatz des Bahnführungsassistentensystems im Vergleich zu den anderen Fahrermodellen am stärksten verbessert werden.

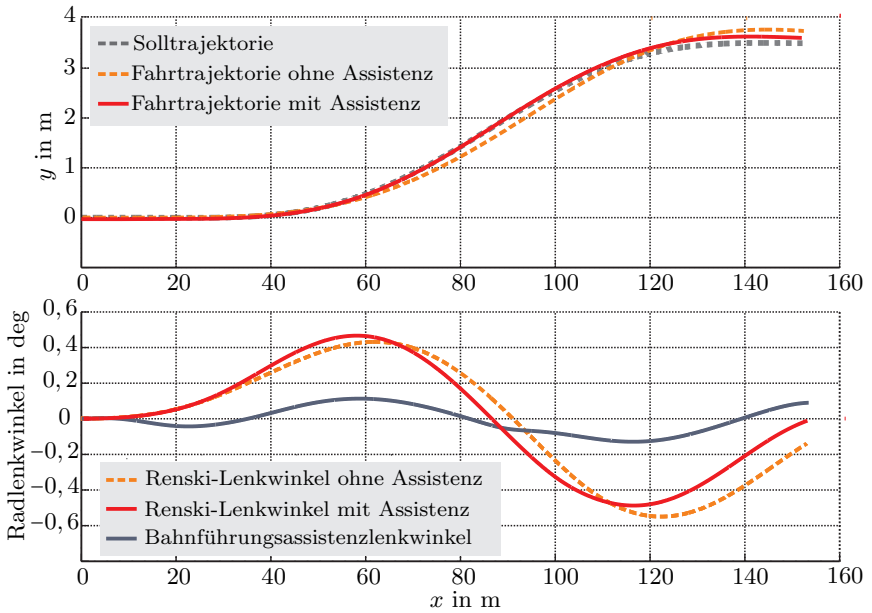


Abbildung 4.19: Renski-Fahrermodellevaluierung bei  $v^{\text{CG}} = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Hier resultiert auch der höchste maximale Bahnführungsassistentenlenkwinkel von  $\delta_{\text{L,Assist,max}} = 3,14 \text{ deg}$ .

Um auch einen quantitativen Vergleich der Fahrermodelle – sowohl mit als auch ohne Bahnführungsassistentensystem – zu realisieren, wird im Folgenden das Gütefunktional

$$J_{\text{FM}} = \underbrace{\int_{t=0 \text{ s}}^{t=5,5 \text{ s}} (\tilde{y}(t)^T \tilde{y}(t)) dt}_{J_{\tilde{y}}} + \underbrace{\int_{t=0 \text{ s}}^{t=5,5 \text{ s}} (\tilde{\psi}(t)^T \tilde{\psi}(t)) dt}_{J_{\tilde{\psi}}} \quad (4.85)$$

zur Bewertung der Sollwertfolge verwendet. Zusätzlich dazu sind der Betrag der mittleren Querabweichung  $|\tilde{y}|$  und Winkelabweichung  $|\tilde{\psi}|$  zu bestimmen. An dieser Stelle muss unterschieden werden, ob bewertet wird, wie menschlich ein Fahrermodell agiert oder welche Qualität das Modell im Hinblick auf die Sollwert-

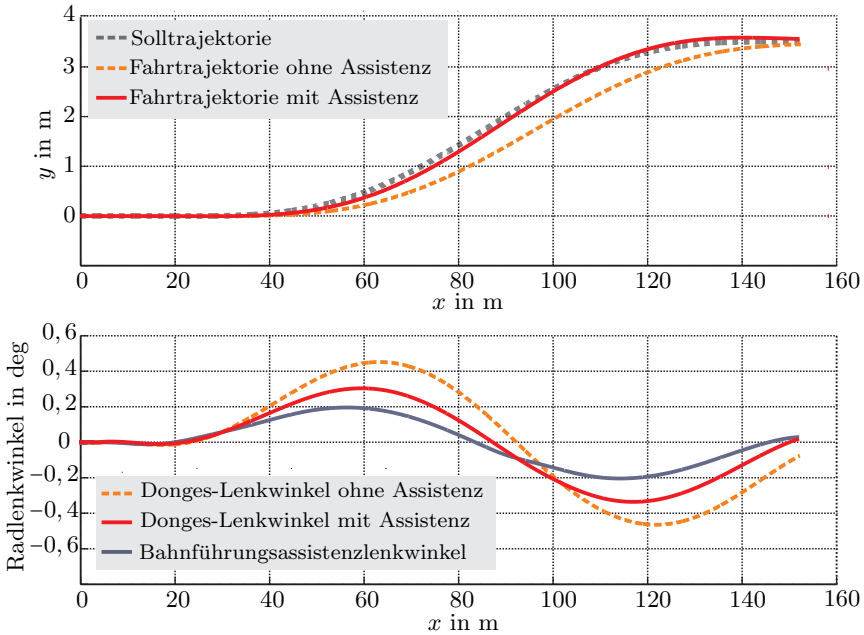


Abbildung 4.20: Donges-Fahrermodellevaluierung bei  $v^{\text{CG}} = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

folge aufweist. Durch die folgende Untersuchung wird lediglich die Sollwertfolge aus technischer Sicht verglichen. Die Auswertungen werden zusammenfassend in Tabelle 4.2 dargestellt. Soll beispielsweise ein Fahrermodell zum exakten Abfahren einer Trajektorie genutzt werden, so ergibt sich für diese Anwendung die Rangfolge

1. Iguchi-Fahrermodell nach [Iguchi \(1959\)](#),
2. Renski-Fahrermodell nach [Renski \(2001\)](#) und
3. Donges-Fahrermodell nach [Donges und Naab \(1996\)](#).



	IGUCHI		RENSKI		DONGES	
	Fahrer	Fahrer&BFA	Fahrer	Fahrer&BFA	Fahrer	Fahrer&BFA
$J_y$	1, 91	2, 06	9, 98	4, 30	25, 08	7, 16
$J_\psi$	0, 12	0, 10	0, 36	0, 13	0, 55	0, 22
$J_{y+\psi}$	2, 01	2, 15	10, 34	4, 43	25, 63	7, 38
$ \widetilde{y} $	0, 02 m	0, 02 m	0, 10 m	0, 05 m	0, 25 m	0, 08 m
$ \widetilde{\psi} $	0, 06 deg	0, 06 deg	0, 21 deg	0, 08 deg	0, 36 deg	0, 13 deg

Tabelle 4.2: Analytische Fahrermodellevaluierung

## 4.5 Stabilitätsnachweis des resultierenden Gesamtsystems

Im Folgenden wird am Beispiel des Renski-Fahrermodells nach [Renski \(2001\)](#) die Stabilität des Gesamtsystems analysiert. Um den Stabilitätsnachweis für das Gesamtsystem – bestehend aus Fahrer, Fahrzeug und Assistenzsystem – mit den klassischen Methoden der Regelungstechnik führen zu können, muss zunächst das Gesamtmodell linearisiert werden. In Abbildung 4.22 wird das Gesamtmodell dargestellt. Hier erfolgt erstmalig auch eine Modellierung der Interaktion zwischen Fahrer und Assistenzsystem. Dazu wird der Differenzwinkel  $\widetilde{\delta} = \delta_{\text{Assist}} - \delta_{\text{Fahrer}}$  aus dem Bahnführungsassistenzsystem  $\delta_{\text{Assist}}$  und dem Fahrerlenkwinkel  $\delta_{\text{Fahrer}}$  gebildet und auf dessen Basis ein Assistenzmoment am Lenkrad mit

$$M_{\text{Assist}} = -k_{\text{Assist}} \widetilde{\delta} \quad (4.86)$$

bereitgestellt. Dieses Assistenzmoment am Lenkrad beeinflusst das Lenkverhalten des Fahrers. Um sowohl die Stärke des Assistenzmoments als auch Änderungsgeschwindigkeit und Dauer der Einwirkung im Interaktionsmodell berücksichtigen zu können, werden sowohl ein proportionaler  $k_{\text{INT,P}}$  als auch ein differentieller  $k_{\text{INT,D}}$  und ein integraler Anteil  $k_{\text{INT,I}}$  berücksichtigt. Der somit zusätzlich generierte Lenkwinkel wird mit dem Fahrerlenkwinkel kombiniert und bildet den Eingang für das Fahrzeugmodell.

Die nichtlinearen, kognitiven Totzeiten im Fahrermodell müssen dazu zunächst linearisiert werden. Die LAPLACE-Transformation eines Totzeit-Elements ergibt sich zu

$$f(t') = f(t - T_{\text{tot}}) \Rightarrow e^{-sT_{\text{tot}}} F(s). \quad (4.87)$$

Lunze (2010) schlägt beispielsweise die Approximation mit  $PTn$ -Elementen, wie in Abbildung 4.21 dargestellt, vor. Der Hauptvorteil liegt in der guten Approximationsgüte. Um diese zu erreichen, werden allerdings sehr hohe Systemordnungen benötigt, was in dem hier vorliegenden Anwendungsfall unerwünscht ist.

Ein weiterer Ansatz nach Föllinger (1994) ist die PADÉ-Approximation. Dazu wird eine gebrochen rationale Übertragungsfunktion verwendet, wobei die Zählerordnung  $k$  kleiner oder gleich der Nennerordnung  $n$  sein muss. Somit ergibt sich mit  $k \leq n$

$$G_{n,k}(z) = \frac{\sum_{i=0}^k b_i(z)^i}{\sum_{i=0}^n a_i(z)^i}. \quad (4.88)$$

Die Koeffizienten  $a_i$  berechnen sich nach

$$a_i = \binom{n}{i} \frac{1}{(2n-1)(2n-2) \dots (2n-i)}, i = 1, \dots, n, \quad (4.89)$$

die Koeffizienten  $b_i$  werden mit

$$b_i = (-1)^i \binom{n-1}{i} \frac{1}{(2n-1)(2n-2) \dots (2n-i)}, i = 1, \dots, n-1, \quad (4.90)$$

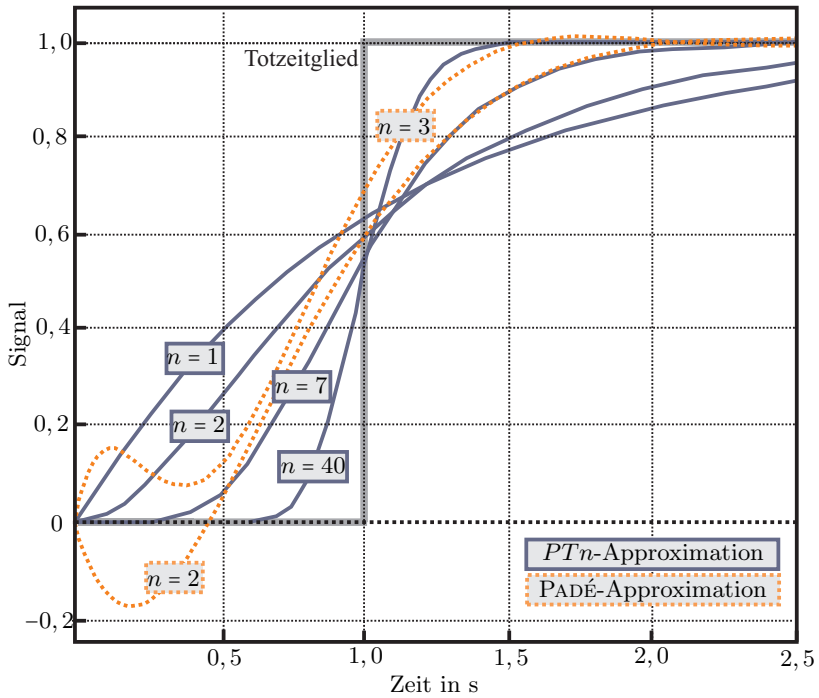
bestimmt.

Die resultierende Übertragungsfunktion mit der Bedingung  $n = m + 1$  ergibt sich zu

$$G_{n,n-1}(Ts) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{n-1} b_i T^i s^i}{1 + \sum_{i=1}^n a_i T^i s^i}. \quad (4.91)$$

Die Übertragungsfunktion für die Zählerordnung  $m = 1$  und die Nennerordnung  $n = 2$  kann somit zu

$$G_{2,1}(T_{\text{tot}}s) = \frac{1 - \frac{1}{3}T_{\text{tot}}s}{1 + \frac{2}{3}T_{\text{tot}}s + \frac{1}{6}T_{\text{tot}}^2s^2} \quad (4.92)$$

Abbildung 4.21:  $PTn$ - und  $PADÉ$ -Approximation von Totzeiten im Vergleich

und für die Zählerordnung  $m = 2$  und die Nennerordnung  $n = 3$  zu

$$G_{3,2}(T_{tot}s) = \frac{1 - \frac{2}{5}T_{tot}s + \frac{1}{20}T_{tot}^2s^2}{1 + \frac{3}{4}T_{tot}s + \frac{3}{20}T_{tot}^2s^2 + \frac{1}{60}T_{tot}^3s^3} \quad (4.93)$$

bestimmt werden. Die Ergebnisse der Approximation werden in Abbildung 4.21 vergleichend dargestellt. Im Vergleich zur  $PnN$ -Approximation zeigt die  $PADÉ$ -Approximation bereits bei einer Nennerordnung von 3 sehr gute Ergebnisse. Aus diesem Grund wird für die weiteren Untersuchungen die  $PADÉ$ -Approximation mit einer Nennerordnung von 3 verwendet.

Das Modell ermöglicht die Durchführung einer Vielzahl von Analysen. So können beispielsweise verschiedene Fahrertypen bzw. Fahrerklassen in Kombination mit dem Bahnführungsassistenzsystem untersucht werden. Einige Anwendungsbeispiele dazu können Siebert (2009) entnommen werden. Weiterhin ist es denk-

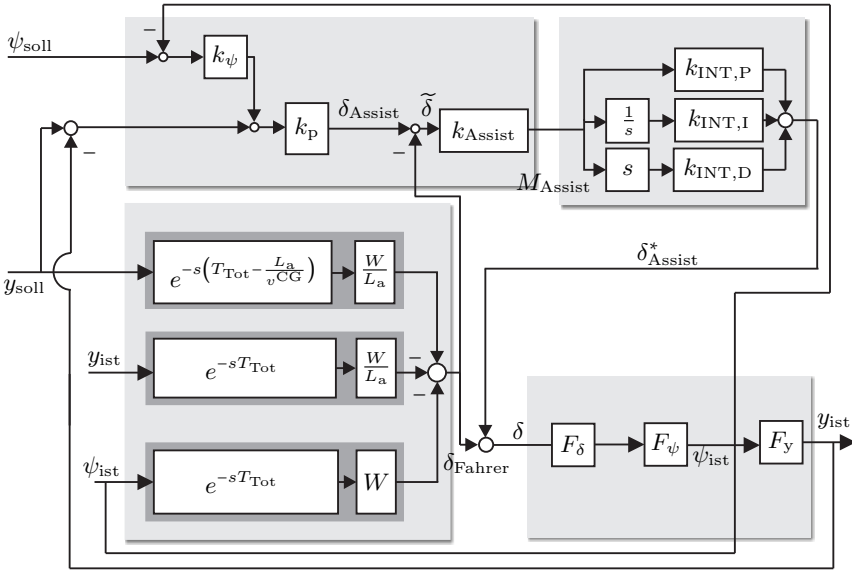


Abbildung 4.22: Resultierende Blockdiagrammdarstellung des Systems

bar, das Assistenzsystem für verschiedene fahrdynamische Zustände optimal zu parametrieren.

In Abbildung 4.23 wird exemplarisch die Sprungantwort für das in Abbildung 4.22 gezeigte Gesamtsystem dargestellt. Die Sollspur  $y_{\text{soll}}$  wird sprungartig um 1 m nach links verschoben, wobei die proportionale Fahrerinteraktion  $k_{\text{INT},P}$  im Intervall  $[-0,25, 0,55]$  variiert wird. Dabei gelten für die Fahrerinteraktion die Parameterbereiche

$$k_{\text{INT},P} \begin{cases} > 0 & \text{Fahrer akzeptiert das Assistenzmoment} \\ = 0 & \text{Fahrer akzeptiert das Assistenzmoment gar nicht} \\ < 0 & \text{Fahrer übersteuert das Assistenzmoment und lenkt gegen.} \end{cases}$$

Die Fehlinterpretation der angebotenen Assistenz drückt sich durch ein negatives  $k_{\text{INT},P}$  aus. Dies zeigt sich in der Sprungantwort durch eine verringerte Sollwertfolge, im Extremfall kann ein instabiles Fahrverhalten resultieren. Wird die angebotene Assistenz im vorgesehenen Maße vom Fahrer interpretiert

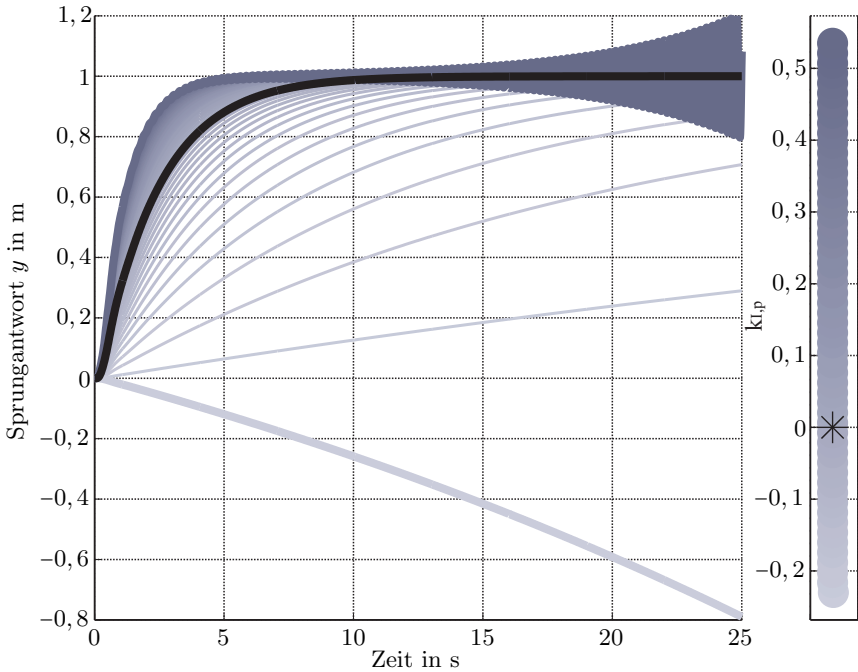


Abbildung 4.23: Evaluierung des Gesamtsystems mit der Sprungantwort

( $k_{\text{INT,P}} \approx [0, 1, 0, 3]$ ), wird der Spurwechsel stabil und präziser durchgeführt. Die fettgedruckte schwarze Linie ist die Sprungantwort für die das Assistenzmoment keine Reaktion beim Fahrer auslöst.

In Abbildung 4.24 wird die entsprechende WOK-Analyse gezeigt. Aufgrund der grafischen Darstellungsmöglichkeit kann die proportionale Fahrerinteraktion hier in einem größeren Intervall  $k_{\text{INT,P}} = [-0, 25, 0, 55]$  variiert werden.

Es ist deutlich erkennbar, dass das Gesamtsystem sowohl bei zu starker Fehlinterpretation des Fahrers als auch für eine überproportional hohe Akzeptanz regelungstechnisch instabil wird. Dies drückt sich durch eine Lage der Pole in der rechten  $s$ -Halbebene aus. Die sternförmigen Markierungen sind der Indikator dafür, dass das Assistenzmoment gar keine Reaktion beim Fahrer zur Folge hat.

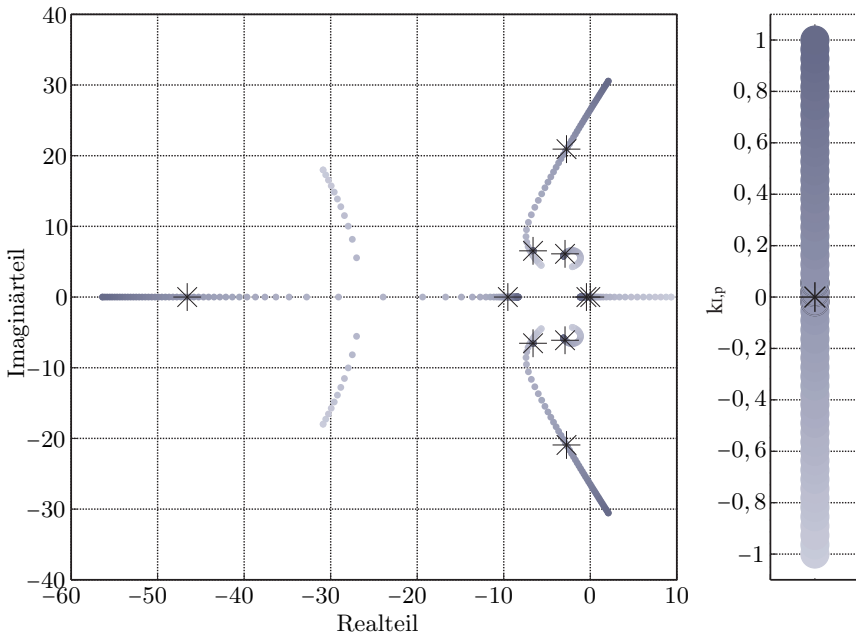


Abbildung 4.24: Evaluierung des Gesamtsystems mit der WOK-Analyse

## 4.6 Erweiterung um ein Spurwechselassistenzsystem

Die Querführungsaufgabe der Fahrzeugführung soll um einen Spurwechselassistenten erweitert werden, um ein ganzheitliches System für die Lenkaufgabe des Fahrers bereitstellen zu können. Im Folgenden wird zunächst ein Gefahrenpotential für einen Spurwechsel auf mehrspurigen, autobahnähnlichen Straßen unter Verwendung der Fuzzy-Methode beschrieben. Die Verarbeitung des Gefahrenpotentials bzw. die Kommunikation zum Fahrer, wird in Kapitel 5 festgelegt.

### 4.6.1 Fuzzy-Methode

Die Fuzzy-Methode wurde ursprünglich von Zadeh (1965) entwickelt. Die Grundidee besteht in der Verwendung von linguistischen Variablen zur unscharfen Beschreibung von physikalischen Größen. Der Hauptvorteil dieses Ansatzes besteht

unter anderem in der Möglichkeit, heuristisches Wissen – oder auch Wissensdatenbanken – zur Formulierung der Regelungsstrategie zu verwenden. Somit ist es nicht notwendig, ein explizites mathematisches Modell zur Beschreibung des Systems verfügbar zu haben. Insbesondere bei sehr komplexen technischen Systemen oder Systemen, die sich durch Unsicherheiten, beispielsweise durch Interaktion mit dem Menschen auszeichnen, kann diese Methode zum Einsatz kommen.

Die klassische Mengentheorie mit der Formulierung scharfer Mengengrenzen muss also für die Fuzzy-Strategie modifiziert werden. In Abbildung 4.25 werden die klassische Mengentheorie (Abbildung 4.25(a)) und die Adaption auf die Fuzzy-Strategie (Abbildung 4.25(b)) vergleichend dargestellt.

Die Zugehörigkeit ist nicht mehr auf eine Menge begrenzt. Grundsätzlich kann jede kontinuierliche Funktion zur Formulierung der Mengen-Zugehörigkeiten genutzt werden. In Abbildung 4.25(b) werden die Dreiecksfunktion  $\mu_{\bar{A}}(x)$  und die Trapezfunktion  $\mu_{\bar{B}}(x)$  genutzt, um die Zugehörigkeit zu den Mengen  $\mu_i$  mit  $i = \{1, 2, 3, 4\}$  zu beschreiben. Die Kopplung kann unter Verwendung der klassischen Logik-Operatoren aus der Mengentheorie realisiert werden. Insbesondere kommen nach [Mamdani \(1975\)](#) das logische ODER

$$\bar{C} = \bar{A} \vee \bar{B} \Rightarrow \mu_{\bar{C}}(x) = \max \{ \mu_{\bar{A}}(x), \mu_{\bar{B}}(x) \} \quad (4.94)$$

und das logische UND

$$\bar{C} = \bar{A} \wedge \bar{B} \Rightarrow \mu_{\bar{C}}(x) = \min \{ \mu_{\bar{A}}(x), \mu_{\bar{B}}(x) \} \quad (4.95)$$

zum Einsatz.

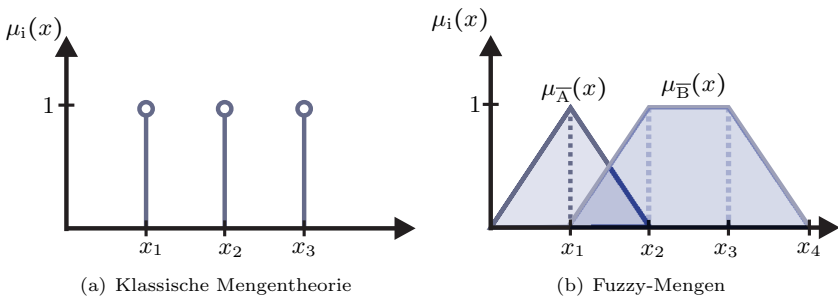


Abbildung 4.25: Vergleich zwischen klassischer Mengentheorie und Fuzzy-Mengen

Der Gesamtablauf einer Systembeschreibung mit der Fuzzy-Methode kann nach [Kiendl \(1997\)](#) oder [Abel \(1991\)](#) in

- die Fuzzyfizierung,
- die Inferenz und
- die Defuzzyfizierung

unterteilt werden. Im Fuzzyfizierungsprozess werden die skalaren Eingangsgrößenwerte in die Zugehörigkeitsgrade der linguistische beschriebenen Mengen zugeordnet. In der Inferenz wird dann die linguistische Regelbasis ausgewertet. Diese enthält die Beschreibungen, wie sich aus den linguistischen Eingangsvariablen die linguistischen Ausgangsvariablen ergeben. Im letzten Prozessschritt – der Defuzzyfizierung – werden abschließend die linguistischen Ausgangsvariablen in physikalisch interpretierbare Regelvariablen bzw. Stellgrößen transformiert. Zur Realisierung existieren verschiedene Methoden, wie beispielsweise in [Börcsök \(2000\)](#) oder [Noll \(2009\)](#) beschrieben.

Im Folgenden wird ausschließlich die MAMDANI-Implikation nach [Mamdani \(1975\)](#) bzw. Max-Min-Inferenz nach Gleichung (4.95) verwendet. Die Zugehörigkeiten werden über die Dreiecks- und Trapezfunktion modelliert. Für die Defuzzyfizierung wird die Flächenschwerpunktmethode eingesetzt.

#### 4.6.2 Ein- und Ausgangsvariablen für den Spurwechselassistenten

Als Aufgabe des Spurwechselassistenten wird grundsätzlich zunächst die Berechnung bzw. Ausgabe des Gefahrenpotentials für einen Spurwechsel auf mehrspurigen, autobahnähnlichen Landstraßen definiert. Das Gefahrenpotential soll in eine numerische Skala im Intervall  $[0, 100 \text{ \%}]$  abgebildet werden, wobei 100 % der maximalen Gefahr für einen Spurwechsel entsprechen. In welcher Form dann dieses Gefahrenpotential zum Fahrer kommuniziert wird, wird in Kapitel 5 definiert.

Die zur Realisierung verwendeten Sensordaten sind zum einen die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{\text{CG}}$  und zum anderen auch die Messdaten vom Heckradarsensor. Somit sind die Differenzgeschwindigkeit und die Position der von hinten heranfahrenden Fahrzeuge im fahrzeugfesten Koordinatensystem  $V^*$  im Sensorbereich als bekannt anzusehen.



### 4.6.3 Fuzzyfizierung

Die verfügbaren Sensordaten werden für alle im Sensorbereich befindlichen Fahrzeuge aufbereitet, so dass vor der Fuzzyfizierung

- die longitudinale Objektdistanz  ${}_{\text{HL}}\tilde{x}^{\text{Obj}}$  bzw.  ${}_{\text{HR}}\tilde{x}^{\text{Obj}}$ ,
- die laterale Objektdistanz  ${}_{\text{HL}}\tilde{y}^{\text{Obj}}$  bzw.  ${}_{\text{HR}}\tilde{y}^{\text{Obj}}$  und
- die Differenz- bzw. Annäherungsgeschwindigkeit  $\tilde{v}^{\text{Obj}}$ ,

wie in Abbildung 4.26 gezeigt, bekannt ist. Dabei werden stets der minimale Abstand von der Sensormontageposition zu einer der vier Eckpunkte des Objekt-Fahrzeugs berechnet sowie eine Transformation auf den Schwerpunktsverbindungsvektor durchgeführt.

#### Fuzzyfizierung für die longitudinale Objektdistanz

Die Fuzzyfizierung für die longitudinale Objektdistanz erfolgt nach Tabelle 4.3 und Abbildung 4.27 in drei Abstufungen für eine maximale Radarsensorreichweite von 50 m.

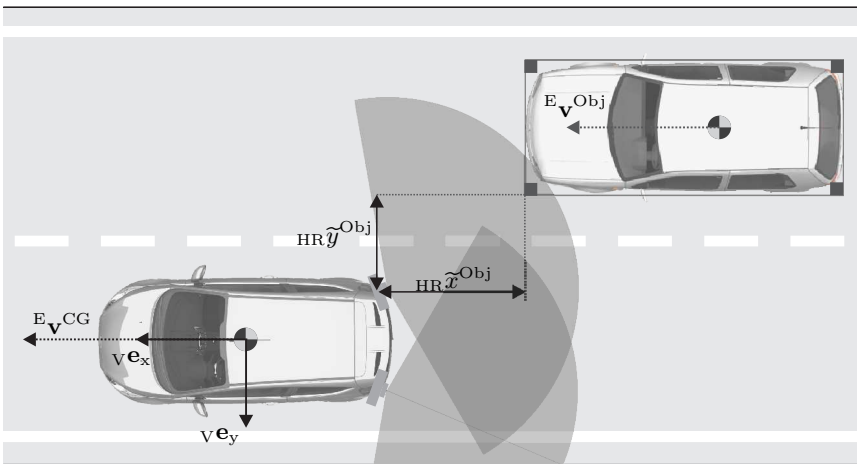


Abbildung 4.26: Darstellung der relativen Hindernis-/Objektposition

Mengenbezeichnung	Beschreibung
$UN$	Unmittelbare Nähe
$MA$	Mittlerer Abstand
$WE$	Weit Entfernt

Tabelle 4.3: Fuzzifizierung der longitudinalen Objektdistanz

Die Definition der Zugehörigkeitsfunktionen erfolgt in den Randbereichen über Trapez- und im Mittelbereich über die Dreiecksfunktion. Die Zugehörigkeitsfunktionen sind so gestaltet, dass sich für beliebige Eingangswerte  $\tilde{x}^{\text{Obj}}$  in Summe ein Zugehörigkeitswert von 1 ergibt. So gilt im Definitionsbereich für  $\tilde{x}^{\text{Obj}}$ , bzw. in der gesamten Sensorreichweite, stets

$$\mu_{\overline{UN}}(\tilde{x}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{MA}}(\tilde{x}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{WE}}(\tilde{x}^{\text{Obj}}) = 1. \quad (4.96)$$

Nach [Kiendl \(1997\)](#) bildet dies die Grundlage, um einen stetigen Verlauf der Ausgangsgröße nach der Defuzzifizierung zu garantieren. Die Gestaltung der Randbereiche erfolgt auf Basis der angenommenen Sensorreichweite.

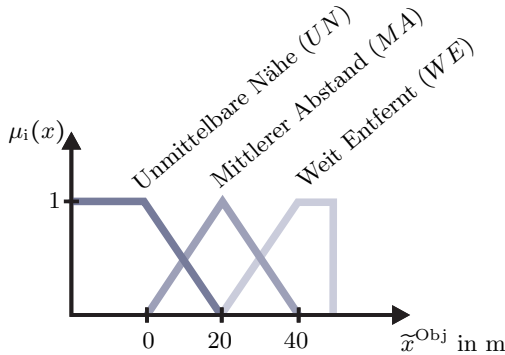


Abbildung 4.27: Fuzzifizierung der longitudinalen Objektdistanz

### Fuzzifizierung für die laterale Objektdistanz

Die Fuzzifizierung für die laterale Objektdistanz erfolgt nach Tabelle 4.4 und Abbildung 4.28 in vier Abstufungen. Die Basis für die Zugehörigkeitsfunktionen bildet eine durchschnittliche Spurbreite von  $b_S = 3$  m. Zur Definition kommen

Mengenbezeichnung	Beschreibung
$EF$	Eine Fahrspur
$IF$	Identische Fahrspur
$ZF$	Zwei Fahrspuren
$KR$	Keine Relevanz

Tabelle 4.4: Fuzzifizierung der lateralen Objektdistanz

ausschließlich Trapezfunktionen zum Einsatz. Dies liegt darin begründet, dass die Fahrspurzugehörigkeit verhältnismäßig gut dem lateralen Objektstand  $\tilde{y}^{\text{Obj}}$  zugeordnet werden kann. Für die Gestaltung der Zugehörigkeitsfunktionen gilt

$$\mu_{\overline{IF}}(\tilde{y}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{EF}}(\tilde{y}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{ZF}}(\tilde{y}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{KR}}(\tilde{y}^{\text{Obj}}) = 1. \quad (4.97)$$

Das größte Gefahrenpotential, bzw. die höchste Gefahreinstufung tritt ein, wenn sich das Objektfahrzeug auf einer benachbarten Fahrspur befindet, auf die das Ego-Fahrzeug potentiell wechseln kann.

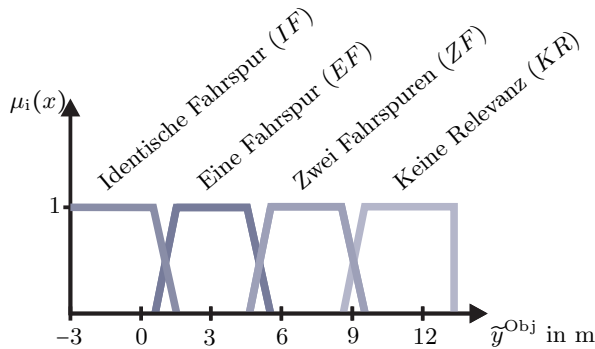


Abbildung 4.28: Fuzzifizierung der lateralen Objektdistanz

### Fuzzifizierung für die Objektdifferenzgeschwindigkeit

Die Fuzzifizierung für die Objektdifferenzgeschwindigkeit erfolgt nach Tabelle 4.5 und Abbildung 4.29 in fünf Einstufungen. Für die Einteilung wird im Betrag eine maximale Differenzgeschwindigkeit von  $\tilde{v}^{\text{Obj}} = 60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  festgelegt. Eine höhere positive Differenzgeschwindigkeit bedeutet, dass sich das Ego-Fahrzeug extrem

Mengenbezeichnung	Beschreibung
<i>HDR</i>	Hohe Distanz-Reduzierung
<i>GDR</i>	Geringe Distanz-Reduzierung
<i>KD</i>	Konstante Distanz
<i>GDZ</i>	Geringe Distanz-Zunahme
<i>HDZ</i>	Hohe Distanz-Zunahme

Tabelle 4.5: Fuzzifizierung der Objektdifferenzgeschwindigkeit

schnell vom Hindernisfahrzeug entfernt, dies wird ohnehin als unkritisch eingestuft. Eine größere negative Differenzgeschwindigkeit wird als Situation mit ma-

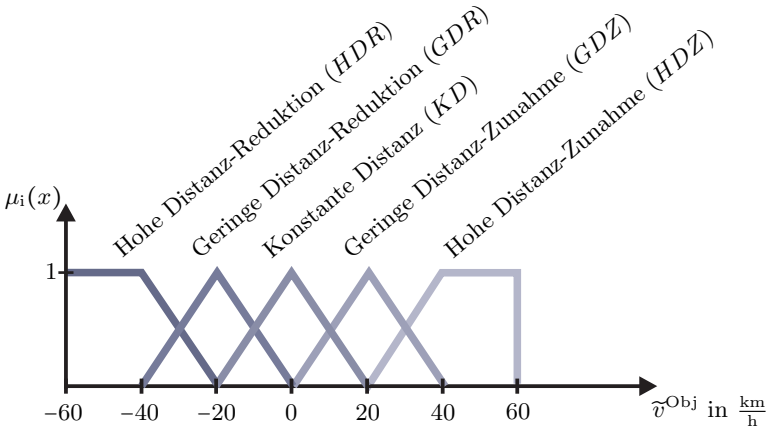


Abbildung 4.29: Fuzzifizierung der Objektdifferenzgeschwindigkeit

ximaler Gefahr interpretiert, da sich das von hinten heranfahrende Fahrzeug extrem schnell annähert. Die Festlegung der Grenzen erfolgt hier in Anlehnung an [ISO17387](#) (Typ C). Auch hier kommen sowohl Trapez- als auch Dreieckfunktion zum Einsatz. Die Auslegung der Zugehörigkeitsfunktionen garantiert für alle Objektdifferenzgeschwindigkeiten  $\tilde{v}^{\text{Obj}}$  im Definitionsbereich

$$\mu_{\overline{\text{HDR}}}(\tilde{v}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{\text{GDR}}}(\tilde{v}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{\text{KD}}}(\tilde{v}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{\text{GDZ}}}(\tilde{v}^{\text{Obj}}) + \mu_{\overline{\text{HDZ}}}(\tilde{v}^{\text{Obj}}) = 1. \quad (4.98)$$

Grundsätzlich wird im Folgenden davon ausgegangen, dass je negativer die Objektdifferenzgeschwindigkeit wird, desto höher das potentielle Gefahrenpotential ist, da die potentielle Kollisionsgeschwindigkeit ebenfalls steigt.

#### 4.6.4 Inferenz

In der Inferenz werden die drei Eingangsgrößen auf eine Regelbasis – das aktuelle Gefahrenpotential – projiziert. Die Einteilung des Gefahrenpotentials erfolgt in Anlehnung an [Tiemann \(2009\)](#) und [Tiemann u. a. \(2010\)](#). Die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten ergibt sich aus den Mengeneinteilungen der longitudinalen Objektdistanz  $n_{\text{lon}}$ , der lateralen Objektdistanz  $n_{\text{lat}}$  und der Objektdifferenzgeschwindigkeit  $n_{\text{vel}}$  zu

$$\dim_{\text{Fuzzy}} = n_{\text{lon}} \times n_{\text{lat}} \times n_{\text{vel}} = 60. \quad (4.99)$$

Die einzelnen Kombinationen werden dann den Gefahrenklassifizierungen in Tabelle 4.6 zugewiesen. Die Skala reicht dabei von {Kein Gefahrenpotential} – für den Fall, dass gar keine Spurwechselgefahr besteht – bis {Maximales Gefahrenpotential} – für den Fall, dass ein Spurwechsel unmittelbar zur Kollision führen würde.

Mengenbezeichnung	Beschreibung
<i>KG</i>	Kein Gefahrenpotential
<i>LG</i>	Latentes Gefahrenpotential
<i>AG</i>	Akutes Gefahrenpotential
<i>UG</i>	Unmittelbares Gefahrenpotential
<i>MG</i>	Maximales Gefahrenpotential

Tabelle 4.6: Mengeneinteilung in der Defuzzifizierung

#### 4.6.5 Defuzzifizierung

Der Systemausgang der **Fuzzy**-Spurwechselgefahrbestimmung ist ein Skalar im Intervall  $G = [0, 100] \%$ . Dieser Wert repräsentiert die potentielle Gefahr für einen Spurwechsel. Die Defuzzifizierung wird – wie in Abbildung 4.30 gezeigt

$\tilde{x}^{\text{Obj}} \equiv \text{Weit Entfernt}$		$\tilde{v}^{\text{Obj}}$				
		<i>HDZ</i>	<i>GDZ</i>	<i>KD</i>	<i>GDR</i>	<i>HDR</i>
$\tilde{y}^{\text{Obj}}$	<i>NR</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>
	<i>ZF</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>
	<i>EF</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>LG</i>	<i>AG</i>	<i>AG</i>
	<i>IF</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>LG</i>	<i>AG</i>
$\tilde{x}^{\text{Obj}} \equiv \text{Mittlerer Abstand}$		$\tilde{v}^{\text{Obj}}$				
		<i>HDZ</i>	<i>GDZ</i>	<i>KD</i>	<i>GDR</i>	<i>HDR</i>
$\tilde{y}^{\text{Obj}}$	<i>NR</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>
	<i>ZF</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>LG</i>	<i>LG</i>	<i>LG</i>
	<i>EF</i>	<i>KG</i>	<i>LG</i>	<i>AG</i>	<i>UG</i>	<i>UG</i>
	<i>IF</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>LG</i>	<i>LG</i>	<i>AG</i>
$\tilde{x}^{\text{Obj}} \equiv \text{Unmittelbare Nähe}$		$\tilde{v}^{\text{Obj}}$				
		<i>HDZ</i>	<i>GDZ</i>	<i>KD</i>	<i>GDR</i>	<i>HDR</i>
$\tilde{y}^{\text{Obj}}$	<i>NR</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>
	<i>ZF</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>LG</i>	<i>LG</i>	<i>LG</i>
	<i>EF</i>	<i>UG</i>	<i>UG</i>	<i>MG</i>	<i>MG</i>	<i>MG</i>
	<i>IF</i>	<i>KG</i>	<i>KG</i>	<i>LG</i>	<i>AG</i>	<i>MG</i>

Tabelle 4.7: Inferenz

– mit der Dreiecksfunktion realisiert. Um auch die Maximal- und Minimalwerte für das Gefahrenpotential erreichen zu können, ist es bei der hier verwendeten Schwerpunktmethod nach [Kiendl \(1997\)](#) von essentieller Bedeutung, dass die Flächenschwerpunkte der Randmengen unter dem zu erreichenden Maximal- bzw. Minimalwert liegen. Aufgrund der unscharfen Formulierung der Mengenzugehörigkeiten treten meist mehrere Regeln zu unterschiedlichen Graden ein. In [Abbildung 4.30](#) wird dazu ein Beispiel eingeführt. In dem hier vorliegenden Fall gilt beispielsweise

$$\mu_{\overline{UG}} = 0,2 \text{ und } \mu_{\overline{MG}} = 0,8 \quad (4.100)$$

mit

$$\mu_{\overline{UG}} + \mu_{\overline{MG}} = 1. \quad (4.101)$$

Der resultierende skalare Wert für die Spurwechselgefahr  $G_{\text{res}}$  wird mit der Schwerpunktmethode

$$G_{\text{res}} = \frac{\int_{G_{\min}}^{G_{\max}} \mu(G) G \, dG}{\int_{G_{\min}}^{G_{\max}} \mu(G) \, dG} \quad (4.102)$$

wobei  $[G_{\min}, G_{\max}]$  der Definitionsbereich der charakteristischen Funktion  $\mu(G)$  ist.

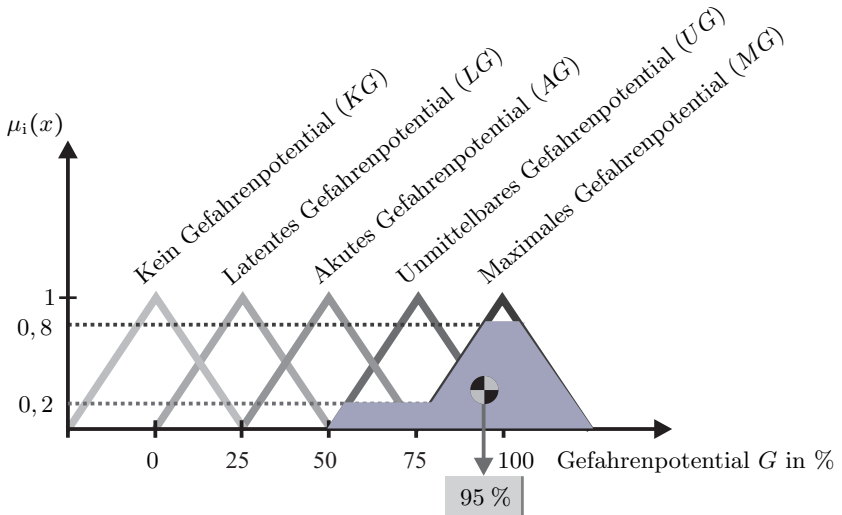


Abbildung 4.30: Defuzzifizierung zur Bestimmung des skalaren Spurwechselgefahrenpotentials

#### 4.6.6 Ergebnisse

Die aus der **Fuzzy**-Strategie resultierenden Gefahrenpotentiale können als räumliche Oberfläche dargestellt werden. Da drei Systemeingänge verwendet werden, ist es für die grafische Darstellung notwendig, einen Eingangsparameter als konstant anzunehmen. Das Gefahrenpotential für eine konstante Objektdifferenzgeschwindigkeit  $\tilde{v}^{\text{Obj}} = 0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  wird in Abbildung 4.31(a) gezeigt. Die maximale Spurwechselgefahr ergibt sich, wenn das Objektfahrzeug auf der Nachbarspur

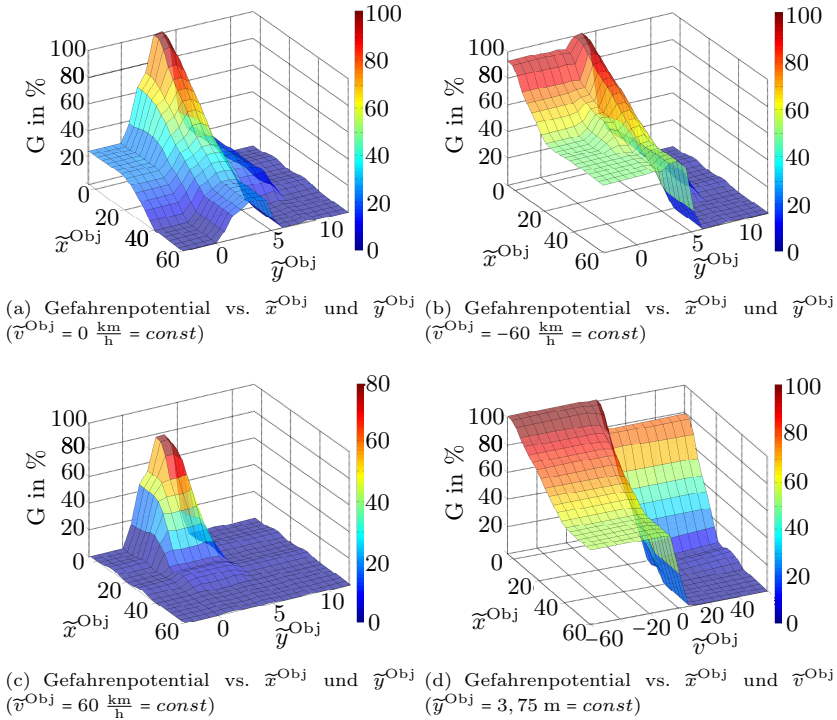


Abbildung 4.31: Oberflächendarstellung des Spurwechselgefahrenpotentials auf Basis der Fuzzy-Strategie ( $\tilde{x}^{\text{Obj}}, \tilde{y}^{\text{Obj}}$  in m,  $\tilde{v}^{\text{Obj}}$  in  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ )

( $\tilde{y}^{\text{Obj}} \approx 3,75 \text{ m}$ ) mit einer longitudinalen Distanz von weniger als 10 m positioniert ist. Der direkte Vergleich der Gefahrenpotentialoberfläche im Fall, dass ein Fahrzeug vergleichsweise schnell von hinten auffährt ( $\tilde{v}^{\text{Obj}} = -60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ), zeigt – wie in Abbildung 4.31(b) dargestellt – eine Zunahme des Gefahrenpotentialniveaus für ein Objektfahrzeug, das auf der Ego-Fahrzeug-Fahrspur fährt ( $dy \approx 0 \text{ m}$ ). Dies ist erwünscht, da die Wahrscheinlichkeit für einen Spurwechsel des Hindernisfahrzeugs und damit das Einleiten eines Überholmanövers mit betragsmäßig steigender negativer Objektdifferenzgeschwindigkeit extrem zunimmt. Somit steigt auch die Gefahr für das Ego-Fahrzeug, einen Spurwechsel einzuleiten. Eine gegenteilige Gefahrenpotentialverteilung ergibt sich für eine positive Objektdifferenzgeschwindigkeit. In Abbildung 4.31(c) zeigt sich die Ausprägung einer charakteristischen



Gefahrenpotentialerhöhung auf der Nachbarspur ( $\tilde{y}^{\text{Obj}} \approx 3,75 \text{ m}$ ) mit einer geringen longitudinalen Objektdistanz ( $\tilde{x}^{\text{Obj}} < 15 \text{ m}$ ). Aufgrund der angenommenen hohen positiven Objektdifferenzgeschwindigkeit von  $\tilde{v}^{\text{Obj}} = 60 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  sind die Flächengradienten mit zunehmenden longitudinalen und lateralen Objektdistanzen sehr steil. Dies bedeutet physikalisch, dass die Spurwechselgefahr stark abnimmt, wenn sich das Ego-Fahrzeug nicht in unmittelbarer Nähe des Objektfahrzeugs befindet und das Ego-Fahrzeug mit einer sehr viel höheren Geschwindigkeit fährt als das Hindernisfahrzeug.

In Abbildung 4.31(d) wird die Gefahrenoberfläche für die Situation dargestellt, dass das Objektfahrzeug auf der Nachbarspur fährt ( $\tilde{y}^{\text{Obj}} = 3,75 \text{ m}$ ). Variiert werden die longitudinale Objektdistanz  $\tilde{x}^{\text{Obj}}$  und die Objektdifferenzgeschwindigkeit  $\tilde{v}^{\text{Obj}}$ . Es ergibt sich ein kontinuierlich steigendes Spurwechselgefahrenpotential für eine betragsmäßig steigende negative Objektdifferenzgeschwindigkeit und eine abnehmende longitudinale Objektdistanz.

### Simulation charakteristischer Manöver

Weiterhin soll das Spurwechselgefahrenpotential für vier – für die Autobahnfahrt charakteristische – Manöver analysiert werden. Die dazu getroffenen Annahmen und Manöver können Tabelle 4.8 entnommen werden.

Um auch den zeitlichen Verlauf der Spurwechselgefahrenpotentiale auflösen zu können, werden vordefinierte Überholmanöver vollständig simuliert.

In Abbildung 4.32 werden die transformierten Heckradarsensor-Messdaten im fahrzeugfesten Koordinatensystem und das resultierende Spurwechselgefahrenpotential dargestellt. Das Objektfahrzeug nähert sich auf der Ego-Fahrzeug-Fahrspur von hinten mit einer Differenzgeschwindigkeit von  $\tilde{v}^{\text{Obj}} = -10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  an.

Wenn das Objektfahrzeug sich auf eine longitudinale Distanz von  $\tilde{x}^{\text{Obj}} = 15 \text{ m}$  angenähert hat, wird das Spurwechselmanöver eingeleitet. Der Spurwechsel ist abgeschlossen, wenn sich das Objektfahrzeug bis auf  $\tilde{x}^{\text{Obj}} = 5 \text{ m}$  an das Ego-Fahrzeug angenähert hat. Das in Abbildung 4.32 ersichtliche Spurwechselgefahrenpotential steigt zunächst relativ moderat an bis zu dem Punkt, an dem der Spurwechsel des Objektfahrzeugs eingeleitet wird. Durch den Spurwechsel nimmt das Gefahrenpotential des Ego-Fahrzeugs ebenfalls zu, daraus resultiert der extreme Gradient im Spurwechselgefahrenpotentialverlauf.


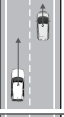

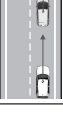
Situationsbeschreibung	Abb.	$\tilde{x}^{Obj}$ in m	$\tilde{y}^{Obj}$ in m	$\tilde{v}^{Obj}$ in $\frac{km}{h}$	G in %
Objektfahrzeug fährt parallel zu Ego-Fahrzeug auf der Nachbarspur mit identischer Geschwindigkeit.		0	3,75	0	90
Objektfahrzeug überholt Ego-Fahrzeug auf der Nachbarspur mit hoher Differenzgeschwindigkeit.		20	3,75	-30	73
Objektfahrzeug fährt auf identischer Fahrspur mit identischer Geschwindigkeit.		40	0	0	12
Objektfahrzeug fährt auf identischer Fahrspur mit negativer Differenzgeschwindigkeit.		40	0	-50	55

Tabelle 4.8: Spurwechselgefahrenpotentiale ausgewählter Fahrsituationen

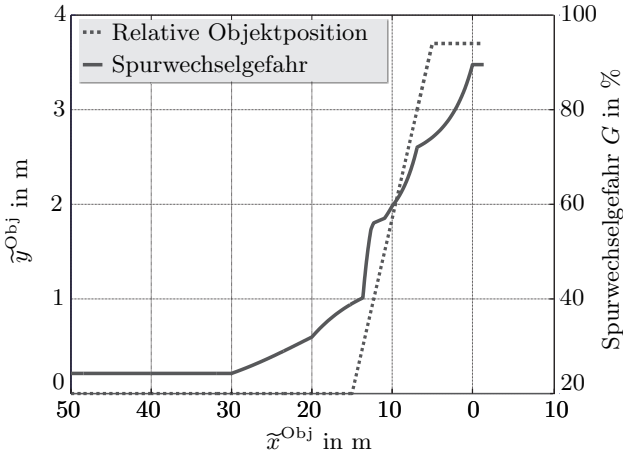


Abbildung 4.32: Verlauf des Spurwechselgefahrenpotentials bei einem Überholmanöver

---

### Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle

---

Im folgenden Kapitel werden die Kommunikation und Interaktion des entwickelten integralen FAS mit dem Fahrer beschrieben. Dazu sollen zunächst die visuellen, akustischen und haptischen Interaktionskanäle definiert und ausgelegt werden. Weiterhin sind die Systemzustände in Abhängigkeit von systemimmanenten und äußeren Einflüssen zu definieren. Zusätzlich dazu ist die Fusion zu einem Gesamtsystem zu realisieren.

Der Bahnführungsassistent ist nach Abschnitt 2.3.1 als aktives FAS auf der Bahnführungsebene für die Querführung zu kategorisieren. Der Spurverlassenassistent hat einen rein warnenden Charakter im Fall des Spurverlassens. Somit soll dieser als passives FAS zugeordnet werden. Auch der Spurwechselassistent informiert den Fahrer vorrangig über die aktuelle Gefahr für ein Spurwechselmanöver. Durch den starken haptischen Eingriff für hohe Gefahrenpotentiale kann das System nicht eindeutig den passiven oder aktiven Fahrerassistenzsystemen zugeordnet werden.

Grundsätzlich wird das Lenkrad als wichtigste MMS für das entwickelte FAS identifiziert, da dieses für die Querführungsaufgabe des Fahrers die größte Bedeutung hat. Zur Bereitstellung einer Assistenz bzw. Fahrempfehlung sowie zur

Ausgabe einer Warnung für den Fahrer ist das Lenkrad hervorragend geeignet. Die MMS wird durch weitere akustische und optische Warnelemente in der Multifunktionsanzeige und im Bereich der Außenspiegel ergänzt. Details werden im Folgenden für die Teilsysteme beschrieben.

Das gesamte FAS ist für einen Geschwindigkeitsbereich von 40 bis  $180 \frac{km}{h}$  und den Einsatz auf Landstraßen und autobahnähnlichen Strecken ausgelegt.

In Abbildung 5.1 wird die Multifunktionsanzeige, die im Fahrsimulator auf einem LCD hinter dem Lenkrad positioniert ist, gezeigt.

Der Systemzustand für den Bahnführungs- und Spurverlassensassistenten sind mittig unter der Geschwindigkeitsanzeige visualisiert. Details dazu werden in Abschnitt 5.1 beschrieben. Weiterhin besteht die Möglichkeit, das aktuelle Fahrerhandmoment und das Überlagerungsmoment in einem Rundinstrument zu überwachen. Diese Anzeige wird vorrangig für die System-Parametrierung während einer virtuellen Simulatorfahrt genutzt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Fahrerhandmoments und die Gestaltung des Bahnführungsassistenzmoments werden in Abschnitt 5.3 vorgestellt.

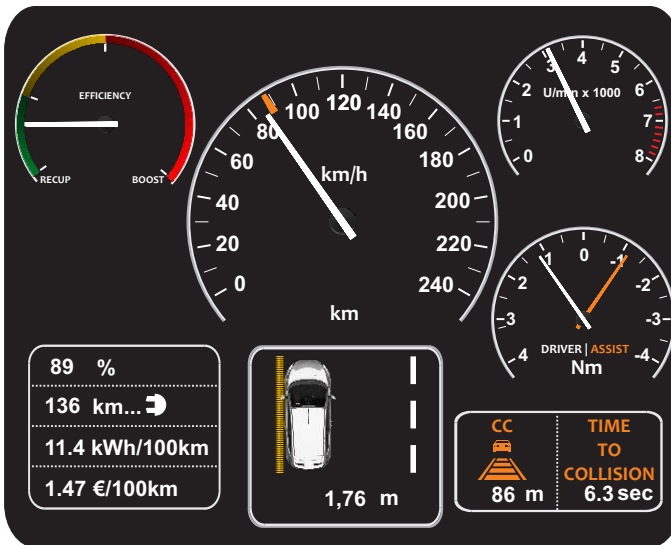


Abbildung 5.1: Multifunktionsanzeige im Fahrsimulator

## 5.1 Visuelle Anzeigeelemente

Im Folgenden erfolgt die Definition der visuellen Kommunikationsschnittstellen zum Fahrer. Über den visuellen Kommunikationskanal können komplexe Informationen für den Fahrer bereitgestellt werden. Die zeitliche Wahrnehmung der Informationen dauert jedoch im Verhältnis zum haptischen Kanal wesentlich länger.

### 5.1.1 Spurverlassens- und Bahnführungsassistent

In der Multifunktionsanzeige werden der Systemzustand und ein Indikator im Fall des Spurverlassens, wie in Abbildung 5.2 dargestellt, angezeigt. Grundsätzlich wird ein virtuelles Fahrzeug – hier ein Ford Fiesta MK7 – aus der Vogelperspektive visualisiert.

Wenn der Fahrer das System abgeschaltet hat oder das System aus anderen Gründen, wie beispielsweise bei einer Fahrgeschwindigkeit außerhalb des Arbeitsbereiches des Systems, deaktiviert ist, werden nur die Umrandungen der virtuellen

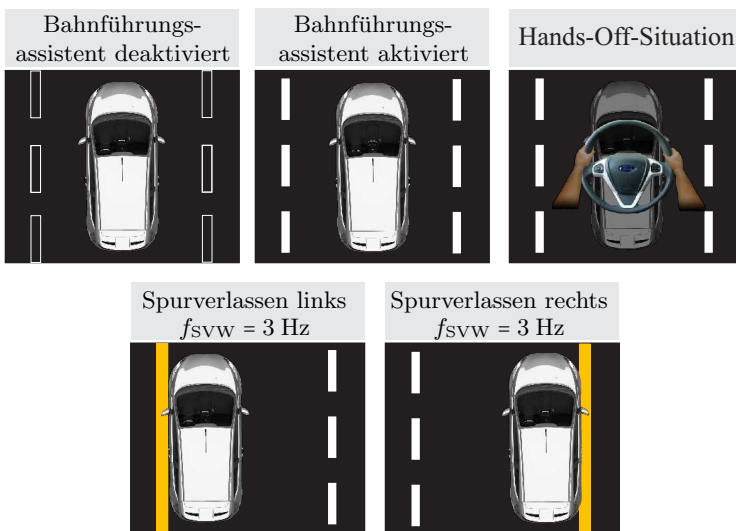


Abbildung 5.2: Visuelles Fahrerinformationssystem für den Bahnführungs- und Spurverlassensassistenten

Spurmarkierungen gezeigt. Wenn das System aktiv ist, sind die Spurmarkierungen in Weiß ausgefüllt.

In der Sondersituation, dass der Fahrer nicht aktiv lenkt bzw. die Hände nicht am Lenkrad hat (Hands-Off-Situation), wird eine Aufforderung zur Übernahme des Lenkrades durch ein Lenkradsymbol vor dem dann halbtransparent dargestellten Fahrzeug gezeigt. Der Algorithmus zur Hands-Off-Erkennung wird in Abschnitt 5.3.3 gezeigt. Im Fall des Spurverlassens zur rechten oder linken Fahrbahnseite werden die jeweils betroffenen Spuren gelb markiert und das fiktive Fahrzeug an der jeweiligen Linie in der Darstellung positioniert. Um weitere Aufmerksamkeit über den visuellen Kanal zu generieren, pulsieren die gelben Markierungen mit einer Frequenz von  $f_{SVW} = 3$  Hz.

### 5.1.2 Spurwechselassistent

Die visuelle Interaktion mit dem Fahrer für den Spurwechselassistenten erfolgt ausschließlich in dem für die Anwendung modifizierten Außenspiegel und stellt die zentrale Schnittstelle dar. Das System kann nach [ISO17387](#) in ein System vom Typ III-C klassifiziert werden. Der in [Abbildung 5.3](#) gezeigte Außenspiegel des verwendeten Ford Fiesta-Fahrsimulators wurde mit zwei LED-Feldern an der Ober- und Unterseite des Spiegelrahmens ausgestattet. Insgesamt sind 18 LEDs in jedem Spiegel verbaut.



Abbildung 5.3: Ford Fiesta MK7-Fahrsimulator Außenspiegel mit integrierten Diodenfeldern

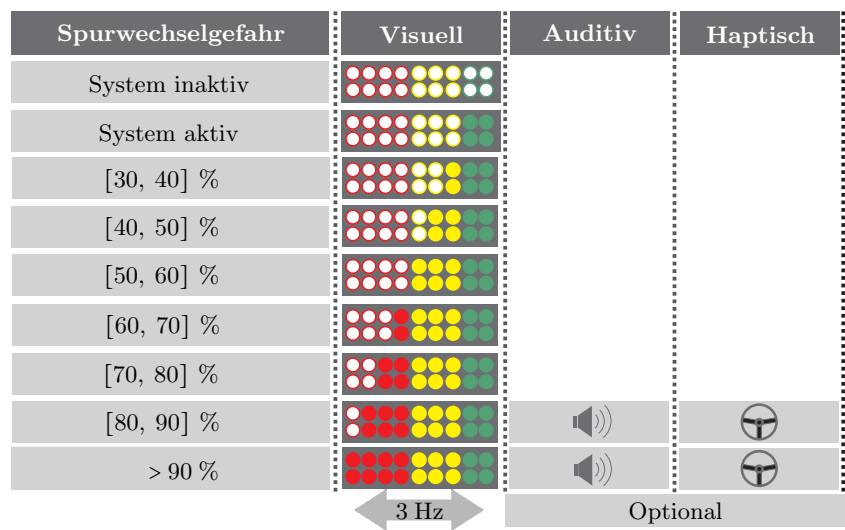


Abbildung 5.4: LCA-Systemzustandsdiagramm

In [Abbildung 5.4](#) wird die Warnstrategie auf Basis des Spurwechselgefahrenpotentials nach [Abschnitt 4.6](#) vorgestellt. In den Außenspiegeln wird zunächst die Information über den Systemstatus vermittelt.

Das System ist im Geschwindigkeitsbereich von 40 bis  $180 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  betriebsbereit, wenn die Sensorik funktionsfähig ist, und kann nicht vom Fahrer deaktiviert werden. Die Systemaktivität wird über die grünen Dioden signalisiert.

Übersteigt das Spurwechselgefahrenpotential bei aktiviertem System einen Wert von 30 % werden die ersten beiden gelben LED zugeschaltet. Die weiteren Eskalationsgrade können [Abbildung 5.4](#) entnommen werden. Die Warnung wird richtungskodiert am rechten und linken Außenspiegel ausgegeben und auch bei betätigtem Fahrtrichtungsanzeiger nicht unterdrückt.

Für extrem hohe Spurwechselgefahrenpotentiale, die einen Wert von 90 % überschreiten, pulsiert das gesamte LED-Band mit einer Frequenz von 3 Hz. Die Pulsrichtung ist dabei so gerichtet, dass der Fahrer intuitiv erkennt, aus welcher Richtung diese hohe Gefahr kommt.

Der Vorteil dieser Realisierung im Vergleich zu aktuellen und in [Abschnitt 2.3.3](#) beschriebenen Spurwechselassistentensystemen besteht insbesondere in der Skalier-

barkeit der Eskalationsgrade und der damit verbundenen Erhöhung des Informationsgehaltes der Warnung.

Der visuelle Kanal eignet sich für diese Anwendung besonders gut, da über ihn der größte Informationsgehalt transportiert werden kann. Den Nachteilen des visuellen Kanals im Bezug auf die kognitive Verarbeitungsgeschwindigkeit der Informationen wird bei hohen Spurwechselgefahrenpotentialen durch eine ergänzende haptische und akustische Assistenz entgegengewirkt.

## **5.2 Akustische Warnungen**

Die akustischen Warnungen werden für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Querführungsassistenzsystem genutzt, um den Systemzustand des aktiv in die Lenkung eingreifenden Bahnführungsassistenten zum Fahrer zu kommunizieren und im Fall eines unbeabsichtigten Spurverlassens oder eines gefährlichen Spurwechsels eine Warnung auszugeben. Um die Wahrnehmung und die kognitive Informationsverarbeitung des Fahrers – auch in Kombination mit weiteren FAS – nicht zu überlasten, wird auf weitere akustische Warntöne verzichtet.

### **5.2.1 Spurverlassens- und Bahnführungsassistent**

Eine einmalige akustische Warnung in Form eines Glockentons wird ausgegeben, wenn das System aufgrund von äußeren Umständen oder durch das Abschalten des Bedieners deaktiviert wird. In der Hands-Off-Situation wird der Fahrer kontinuierlich durch den Glockenton aufgefordert, die Lenkaufgabe wieder zu übernehmen.

### **5.2.2 Spurwechselsassistent**

Der Systemstatus des Spurwechselsassistenten wird nicht durch ein akustisches Signal angezeigt. Im Fall, dass eine Spurwechselgefahr mit einem Wert größer als 80 % vorliegt und eine eindeutige Spurwechselintention des Fahrers erkannt wird, soll die Ausgabe einer kontinuierlichen akustischen Warnung durch einen Glockenton erfolgen. So kann die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Gefahrensituation weiter erhöht werden.



### 5.3 Haptische Interaktion

Der haptische Interaktionskanal über das Fahrzeuglenkrad stellt für das integrale Querführungsassistenzsystem die zentrale Schnittstelle für die aktive Assistenz dar. Bei der Gestaltung der Überlagerungsmomente am Lenkrad ist nach der Wiener Konvention (UN-Konferenz (1968)) darauf zu achten, dass jede Fahrerin und jeder Fahrer in jeder Fahrsituation das Assistenzmoment übersteuern können. Das maximale am Lenkrad wirkende Überlagerungsmoment wird auf  $|M_{\text{Assist, res}}| < 3 \text{ Nm}$  begrenzt.

Die grundlegende Strategie zur Gestaltung des resultierenden überlagerten Lenkassistentenmomentes wird in Abbildung 5.5 gezeigt. Das resultierende Moment ist eine Kombination aus Spurverlassens-, Bahnführungs- und Spurwechselassistentenmoment. Die einzelnen Momente werden in Abhängigkeit vom aktuellen Fahrerzustand und der Fahrsituation angepasst. Die dazu verwendeten Charakteristika werden zusammenfassend in Abbildung 5.5 vorgestellt.

Die Summe der resultierenden adaptierten Assistenzmomente wird dann nochmals limitiert, bevor dieses am Lenkrad überlagert wird, so dass für den Fahrer jederzeit die Möglichkeit besteht, das System zu übersteuern. Die Vorgehensweise zur Berechnung der Assistenzmomente sowie deren Anpassung wird im Folgenden aufgezeigt.

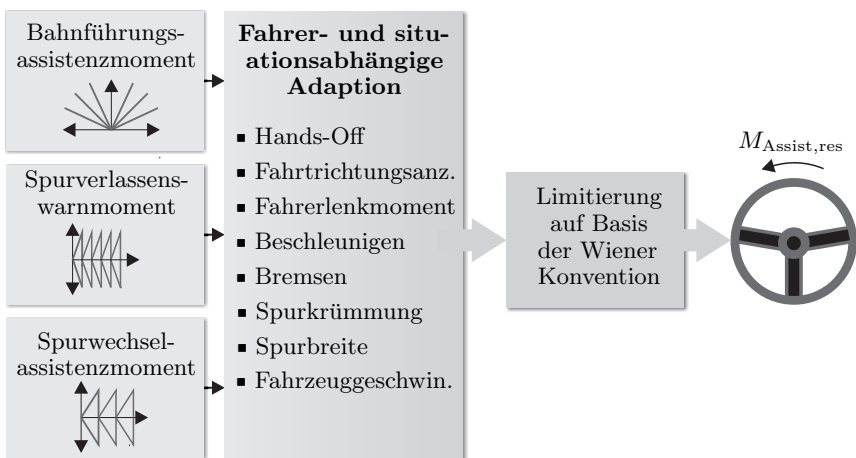


Abbildung 5.5: Gesamtdarstellung der haptischen Interaktionsstrategie

### 5.3.1 Spurverlassens- und Bahnführungsassistent

Die Spurverlassenswarnung soll einmalig ausgegeben werden, wenn die nach Abschnitt 4.2.1 berechnete Zeit bis zum Überfahren der Fahrbahnrandmarkierung kleiner als eine Zehntelsekunde ( $TLC < 0,1 \text{ s}$ ) ist. Die Warnung erfolgt – wie in Abbildung 5.6 gezeigt – einmalig durch einen gerichteten Sägezahnimpuls mit fünf Impulsen und einer Frequenz  $f_{\text{SVW,hap}} = 15 \text{ Hz}$ . Die Lenkrichtungsinformation wird durch das Vorzeichen der Sägezahnfunktion kodiert. Das gesamte Lenkrad rotiert um seine auch für die Lenkbewegung verwendete Lenkachse, es werden keine zusätzlichen Schwingungsaktoren im Lenkrad genutzt.

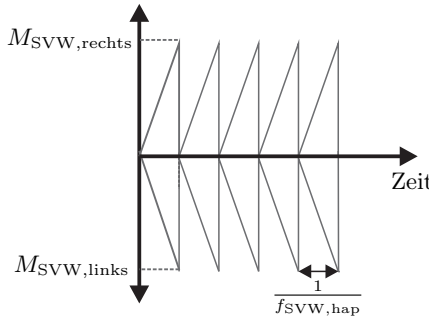


Abbildung 5.6: Haptische Spurverlassenswarnung

Der in Abschnitt 4.3.1 hergeleitete potentialfeldbasierte Bahnführungsregler soll verwendet werden, um ein Überlagerungsassistenzmoment im Lenkrad zu gestalten. Grundsätzlich wird zunächst der aktuelle Reglerlenkwinkel mit dem Fahrerlenkwinkel nach

$$\tilde{\delta} = \delta_{\text{Assist}} - \delta_{\text{L}} \quad (5.1)$$

verglichen. Der resultierende Differenzlenkwinkel kann dann beispielsweise linear für die Gestaltung des Basis-Bahnführungsassistenzmoments mit

$$M_{\text{Assist, Basis}} = -k_{\text{Assist}} \tilde{\delta} \quad (5.2)$$

verwendet werden. Um einer Bevormundung des Fahrers entgegenzuwirken, wird das Basis-Bahnführungsassistenzmoment mit

$$M_{\text{Assist}} = M_{\text{Assist,basis}} k_{\text{Fahrer}}(M_{\text{Fahrer}}) \quad (5.3)$$

auf Basis des aktuellen Fahrerlenkwunsches, der durch das Fahrerlenkmoment  $M_{\text{Fahrer}}$  bestimmt werden kann, skaliert. Die Gestaltung der Skalierung erfolgt mit dem maximal zu erwartenden Fahrerlenkmoment  $M_{\text{Fahrer,max}}$  ab einem Start-fahrerlenkmoment  $M_{\text{skal,start}}$  zu

$$k_{\text{Fahrer}}(M_{\text{Fahrer}}) = 1 - \max\left(0, \frac{|M_{\text{Fahrer}}| - M_{\text{skal,start}}}{|M_{\text{Fahrer,max}}|}\right). \quad (5.4)$$

Damit der Fahrkomfort nicht durch sprungförmige Lenkmomente beeinflusst wird, ist der Gradient des Bahnführungsassistenzmoments auf

$$\dot{M}_{\text{Assistent}} = \left[-\dot{M}_{\text{Assistent,max}}, \dot{M}_{\text{Assistent,max}}\right] \frac{\text{Nm}}{\text{s}} \quad (5.5)$$

zu begrenzen (siehe dazu beispielsweise [Schmidt u. a. \(2007\)](#)). Die resultierenden Assistenzmomentkennlinien auf einer krümmungsfreien Straße, einem Fahrerlenkwinkel von  $\delta_L = 0$  deg und einer Winkelabweichung in der Fahrspur  $\tilde{\psi} = 0$  deg ergeben sich wie in Abbildung 5.7 dargestellt. Für den speziellen Fall ist nur der von der Querablage abhängige Anteil wirksam. Je stärker der Fahrer lenkt, desto flacher wird die Kennlinie gestaltet. Das Fahrerhandmoment skaliert also den Gradienten  $\frac{\partial M_{\text{Assist,res}}}{\partial \tilde{y}}$ . Ab einem Fahrerlenkmoment von  $M_{\text{Fahrer}} = 3$  Nm wird das Assistenzmoment vollständig deaktiviert. Weiterhin ist die Limitierung auf das maximale Assistenzmoment zu erkennen.

In Abbildung 5.8 wird das Bahnführungsassistenzmoment in Abhängigkeit der relativen Winkelabweichung  $\tilde{\psi}$  in der Fahrspur für  $k_{\text{Assist}} = 2200 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$  aufgezeigt. Hier lässt sich erkennen, dass durch die parallele Reglerstruktur bei großen Winkelablagen ein abfallendes Moment resultiert. Die Kennlinie wird also parallel zur  $M_{\text{Assist}}$  verschoben. Diese Auslegung reduziert das Überschwingen, welches aus herkömmlichen Spurhalteassistentensystemen bekannt ist.

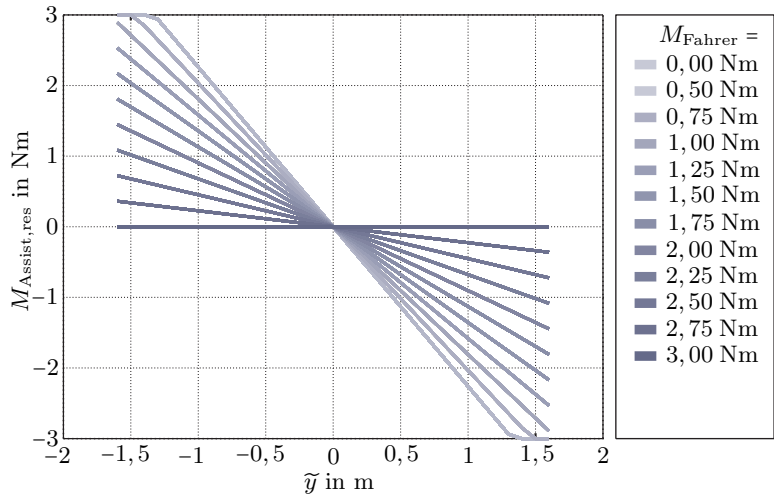


Abbildung 5.7: Bahnführungsassistentenmoment in Abhängigkeit von Querablage und Fahrerlenkmoment

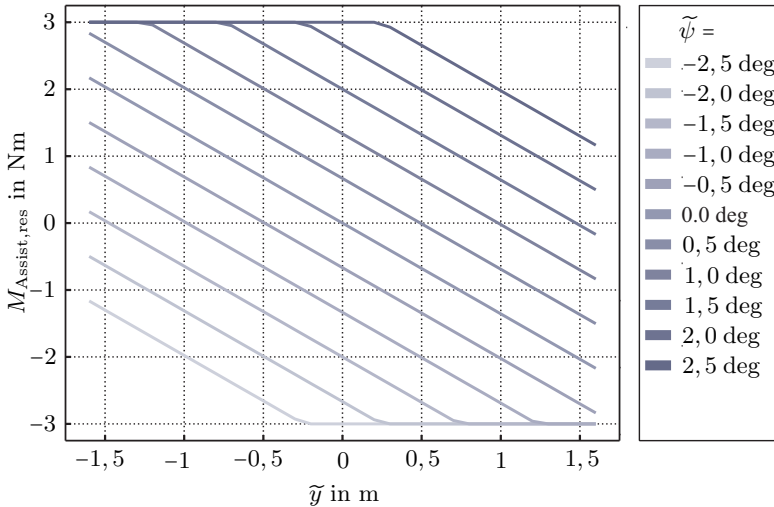


Abbildung 5.8: Bahnführungsassistentenmoment in Abhängigkeit von Quer- und Winkelablage

Als Aktor wird der SENSOWHEEL-DC-Elektromotor aus Abschnitt 3.4 verwendet. Es ist nach Pfeffer und Harrer (2011) möglich, den Serienaktor einer elektrischen Servolenkung für die Applikation des Systems im realen Fahrzeug zu verwenden.

Im Hands-Off-Zustand wird die aktive Lenkunterstützung des Bahnführungsassistenten nach fünf Sekunden deaktiviert, die Spurverlassenswarnung in Form der Sägezahnvibration bleibt jederzeit aktiv, wenn das System aktiviert und betriebsbereit ist. Auch wenn der Fahrer den Fahrtrichtungsanzeiger betätigt, wird das Bahnführungsassistentenmoment in die jeweilige Richtung temporär deaktiviert. Wenn der Fahrer oder das Fahrzeug den Blinker wieder deaktiviert, bleibt das Bahnführungsassistentenmoment noch weitere acht Sekunden deaktiviert. So kann der Fahrer – auch wenn der Fahrtrichtungsanzeiger nur durch die Komfortfunktion (einmal antippen) betätigt wird – ohne Bevormundung des Systems den Spurwechsel abschließen.

In dynamischen Fahrsituationen, wenn der Fahrer beispielsweise stark beschleunigt oder bremst und somit den Komfortbereich verlässt, wird das aktive Bahnführungsmoment temporär deaktiviert. In diesen Fällen kann davon ausgegangen werden, dass der Fahrer beispielsweise auf die Autobahn auffährt oder zum Überholen ansetzt. Die Beschleunigungsgrenzen werden zu  $a_x^{CG} = [-4, 4] \frac{m}{s^2}$  festgelegt. Wird dieses Beschleunigungsintervall verlassen, wird das Bahnführungsassistentenmoment für acht Sekunden deaktiviert.

### 5.3.2 Spurwechselassistent

Im Fall, dass die nach Abschnitt 2.3.3 berechnete Spurwechselgefahr einen Wert von 80 % überschreitet und die Fahrer-Spurwechselintention eindeutig erkannt wird, soll zusätzlich eine niederfrequente, gerichtete Sägezahnvibration mit der Frequenz  $f_{SWA, hap} = 2 \text{ Hz}$  im Lenkrad überlagert werden. In Abbildung 5.9 wird die Kennlinie qualitativ gezeigt.

### 5.3.3 Fahrerlenkmomentbeobachter

Das Fahrer-Lenkradmoment ist eine wichtige Größe, um das Fahrerverhalten bzw. die Fahreraufmerksamkeit zu bewerten (siehe z. B. Bender (2008)). Insbesondere für den Fall, dass Überlagerungsmomente im Lenkrad eingeleitet werden, ist die Kenntnis über das aktuelle Fahrerlenkmoment wichtig.

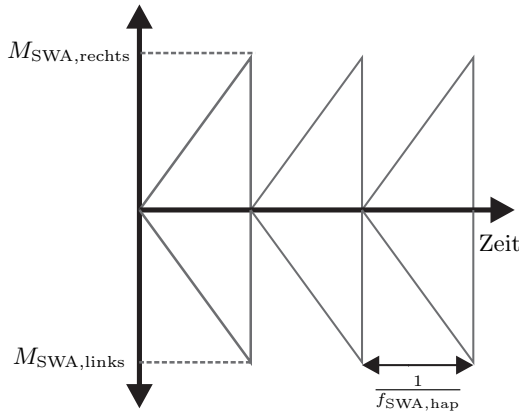


Abbildung 5.9: LCA-Kennlinie

Die Überlagerungsmomente werden auf Basis des aktuellen Fahrerlenkmomentes angepasst. Insbesondere die Hands-Off-Erkennung – also die Erkennung, dass der Fahrer nicht die Hände am Lenkrad hat bzw. nicht aktiv lenkt – ist von entscheidender Bedeutung.

Zur Realisierung der Fahrer-Handmomentmessung kann – falls vorhanden – der ohnehin für die elektrische Servolenkung benötigte Drehmomentsensor verwendet werden. Werden die Überlagerungsmomente aber beispielsweise an einem Fahrzeug mit hydraulischer Servolenkung durch einen zusätzlichen elektrischen Aktor bereitgestellt, so ist das Fahrerlenkmoment bzw. das in der Lenksäule wirkende Moment nicht direkt messbar. Eine Möglichkeit zur Ermittlung des Fahrerlenkmomentes ist beispielsweise der Einsatz eines KALMAN-Filters ([Kalmann \(1960\)](#)).

Nach [Welch und Bishop \(2006\)](#) ist der KALMAN-Filter ein Satz mathematischer Gleichungen, um effizient und rekursiv den Systemzustand durch die Minimierung des mittleren Fehlerquadrates des mittleren Schätzfehlers zu rekonstruieren. Der Filter wird insbesondere eingesetzt, wenn Systemzustände nicht direkt messbar sind oder die Messungen durch Störungen beeinflusst sind. Somit können bei einer bekannten Systemstruktur bzw. Systemdynamik Messungenauigkeiten entfernt werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der Einsatzmöglichkeit in Echtzeitprozessen. Die Grundstruktur ist Prädiktor-Korrektor-basiert, wobei sowohl das Prozessmodell als auch die Messungen aus einem deterministischen Teil und einem additiven – durch weißes Rauschen charakterisierten – Anteil bestehen.

Für die Realisierung des KALMAN-Zustandschätzers wird ein Modell des zu Grunde liegenden bzw. des zu beobachtenden Systems benötigt. Im Folgenden wird die Realisierung für ein Lenksystem mit Direktantrieb – so wie es in vielen Fahr simulatoren verwendet wird und in Abbildung 5.10 dargestellt ist – beschrieben.

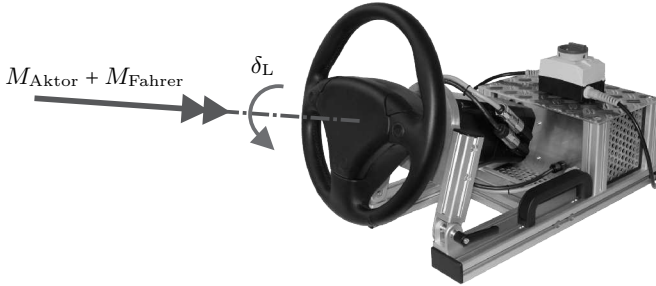


Abbildung 5.10: Fahr simulator-Tischlenkrad

Das System kann mit der Systemträgheit  $J_L$ , der Lenkradwinkelbeschleunigung  $\ddot{\delta}_L$ , der internen Lenksystemdämpfung  $d_{LD}$ , dem Fahrerhandmoment  $M_{\text{Fahrer}}$  und dem Aktordrehmoment  $M_{\text{Aktor}}$  durch die NEWTON-EULER-Gleichung

$$J_L \ddot{\delta}_L + d_{LD} \dot{\delta}_L = M_{\text{Fahrer}} + M_{\text{Aktor}} \quad (5.6)$$

beschrieben werden. Mit den Systemzuständen

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_L \\ \dot{\delta}_L \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

und dem Systemeingangsvektor

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{\text{Aktor}} \\ M_{\text{Fahrer}} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

ergibt sich das lineare Zustandsraummodell mit der Regeingangsmatrix  $\mathbf{B}_{\text{SC}}$  und der Störeingangsmatrix  $\mathbf{B}_{\text{SD}}$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\delta}_{\text{L}} \\ \ddot{\delta}_{\text{L}} \end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{d_{\text{LD}}}{J_{\text{L}}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} \delta_{\text{L}} \\ \dot{\delta}_{\text{L}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_{\text{L}}} & \frac{1}{J_{\text{L}}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \underbrace{\begin{bmatrix} M_{\text{Aktor}} \\ M_{\text{Fahrer}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}}. \quad (5.9)$$

Unter der Annahme, dass sowohl der Lenkwinkel  $\delta_{\text{L}}$  als auch die Lenkwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\delta}_{\text{L}}$  messbar sind, ergibt sich der Messvektor zu

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \delta_{\text{L}} \\ \dot{\delta}_{\text{L}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}=\mathbf{C}_{\text{M}}} \underbrace{\begin{bmatrix} \delta_{\text{L}} \\ \dot{\delta}_{\text{L}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \underbrace{0}_{\mathbf{D}_{\text{SC}}} & \underbrace{0}_{\mathbf{D}_{\text{SD}}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \underbrace{\begin{bmatrix} M_{\text{Aktor}} \\ M_{\text{Fahrer}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}}. \quad (5.10)$$

Um die Hands-Off-Situation zu erkennen, wird das Fahrerhandmoment im Folgenden als Störung interpretiert. Dazu wird das Modell nun um ein integriertes Störmodell erweitert. Mit diesem Modell kann die mathematische Korrelation des Störeingangs  $M_{\text{Fahrer}}$  und den Systemausgängen  $\delta_{\text{L}}$  und  $\dot{\delta}_{\text{L}}$  beschrieben werden. Die Systemmatrizen resultieren zu

$$\mathbf{A}_{\text{D}} = 0, \quad (5.11)$$

$$\mathbf{B}_{\text{D}} = 1, \quad (5.12)$$

$$\mathbf{C}_{\text{D}} = 1 \quad \text{und} \quad (5.13)$$

$$\mathbf{D}_{\text{D}} = 0. \quad (5.14)$$

Werden die Modelle aus Gleichung (5.9) und Gleichung (5.11) kombiniert, ergeben sich die Gesamtsystemmatrizen zu

$$\mathbf{A}_{\text{A}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_{\text{SD}}\mathbf{C}_{\text{D}} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{\text{D}} \end{bmatrix}}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{d_{\text{LD}}}{J_{\text{L}}} & \frac{1}{J_{\text{L}}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.15)$$



$$\mathbf{B}_A = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{SC} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}}_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{J_L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.16)$$

$$\mathbf{C}_A = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{SM} & \mathbf{D}_{SD} \mathbf{C}_D \end{bmatrix}}_{2 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

und

$$\mathbf{D}_A = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{D}_{SC} & \mathbf{D}_{SM} \mathbf{D}_D \end{bmatrix}}_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.18)$$

Im Folgenden wird ein klassischer Beobachter auf Basis des in Abbildung 5.11 gezeigten KALMAN-Filters ([Kalmann \(1960\)](#)) für die Bestimmung des nicht direkt messbaren Fahrerhandmomentes angewendet. Die im System messbaren Größen werden zum Simulationsmodell zurückgeführt. Die KALMAN-Verstärkungsmatrix wird mit  $L$  bezeichnet und in Abhängigkeit der Messkovarianzmatrix

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} 1,2 \cdot 10^{-8} & 0 \\ 0 & 1 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

und der Prozesskovarianzmatrix

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

definiert. So ist es dann möglich, die Ausgänge des Störmodells mit den messbaren Systemzuständen so zu korrigieren, dass das zu beobachtende Fahrerhandmoment optimal bestimmt werden kann.

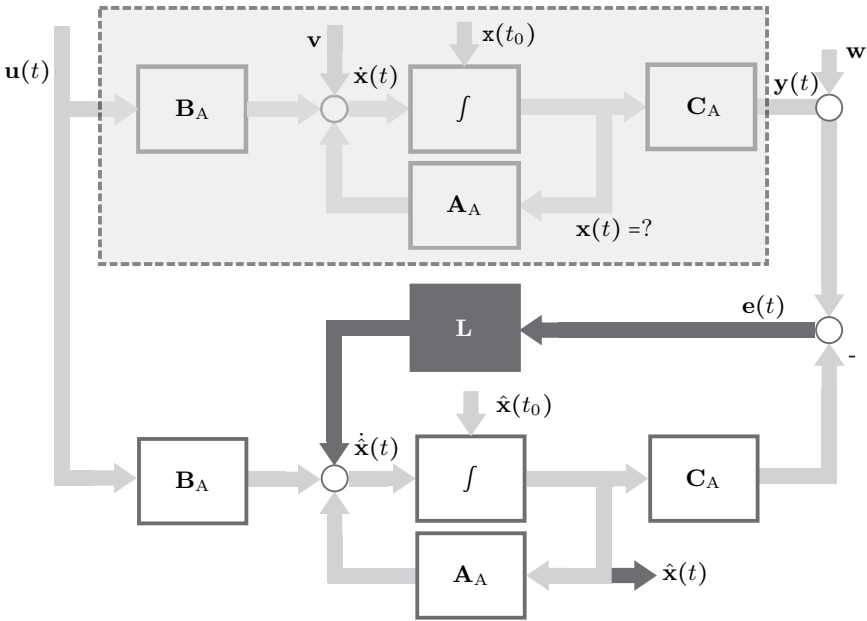


Abbildung 5.11: Klassisches KALMAN-Filter

Besonders bei der reinen Geradeausfahrt, bei der im Idealfall kein Lenkmoment zum Spurhalten aufgebracht werden muss, ist die Hands-Off-Erkennung eine besondere Herausforderung. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Erkennungsgüte ist die krümmungsabhängige Anpassung des Handmomentschwellwertes für die Hands-Off-Erkennung. Auch bei Geradeausfahrt übt der Fahrer kontinuierlich kleine Korrekturbewegungen in der Lenkung aus. Durch die sensiblere Parametrierung kann dann auch so eine Erkennung gewährleistet werden.

Nach [Ishida u. a. \(2003\)](#) kann mit einem Fahrzeugmodell das benötigte Fahrerlenkmoment berechnet werden und durch einen Vergleich mit dem gemessenen Lenkmoment ein Rückschluss auf die Hands-Off-Situation durchgeführt werden. Um eine sichere Entscheidung treffen zu können, ist ein Zeitraum von 5 bis 15 Sekunden notwendig. In dieser Zeit fährt das Fahrzeug theoretisch autonom in der Querführung. Es sind diverse *Misuse-Cases* wie beispielsweise die Modifikation des Lenkrades mit Zusatzgewichten oder die Erhöhung der inneren Lenkungsreibung durch die Verklebung des Lenkrades mit dem Knie denkbar.

---

### Systemevaluierung in einer Fahrsimulatorstudie

---

Im folgenden Kapitel werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Evaluierung des entwickelten menschenzentrierten Querführungsassistenzsystems im Fahrsimulator aufgezeigt. Zunächst erfolgt die Beschreibung des Simulatorenbbaus und des Szenarios. Anschließend wird die Versuchsdurchführung inklusive der Fahraufgabe beschrieben. Die Methoden zur Bewertung des FAS werden darüber hinaus definiert. Abschließend erfolgt die subjektive und quantitative Analyse der aufgezeichneten Messdaten und der Fragebögen sowie eine Bewertung des FAS.

#### 6.1 Versuchsaufbau und Preprocessing

Für die Fahrsimulatorstudie wird der bereits in Kapitel 3 beschriebene Ford Fiesta Simulator verwendet. Um das FAS testen zu können, ist ein besonders großer Visualisierungswinkel notwendig, damit auch Fahrzeuge auf der Nachbarspur und im toten Winkel darstellbar sind. Insbesondere muss die Möglichkeit zur Überwachung der Außen- und Innenspiegel bestehen, um den rückwärtigen Verkehr beobachten zu können.

### 6.1.1 Grundaufbau des Ford Fiesta-Simulators

Der in Abbildung 6.1 gezeigte Fiesta-Simulator basiert auf einem serienmäßigen Ford Fiesta und wird verwendet, um die in dieser Arbeit entwickelten FAS zu evaluieren (siehe dazu Kapitel 5). Einer der Hauptvorteile bei der Verwendung eines Realfahrzeugs liegt darin, dass der Fahrerarbeitsplatz vollständig erhalten bleibt.

Das Lenkungs- und Bremssystem wurde für den Simulatorbetrieb mit Aktoren und Sensoren ausgestattet, um die Fahrereingaben in der Fahrzeugsimulation verfügbar zu machen und dem Fahrer Rückmeldungen aus der Simulation – wie beispielsweise das Lenkmoment – bereitzustellen.

Die Visualisierung der virtuellen Realität erfolgt mit insgesamt fünf Projektoren vom Typ Acer P5403. Die DLP-Projektoren verfügen über eine SXGA+-Auflösung von 1400 x 1050 Pixeln und eine Helligkeit von 3000 ANSI-Lumen. Die Projektoren werden genutzt, um ein Visualisierungs-CAVE zu realisieren. Dazu werden drei Projektoren für die Frontansicht verwendet. So ergibt sich eine Bildgröße von 4,60 x 2,00 m mit 4200 x 1050 Pixeln. Für die seitlichen Ansichten wird jeweils ein Projektor in horizontaler Anordnung verwendet. Dort ergibt

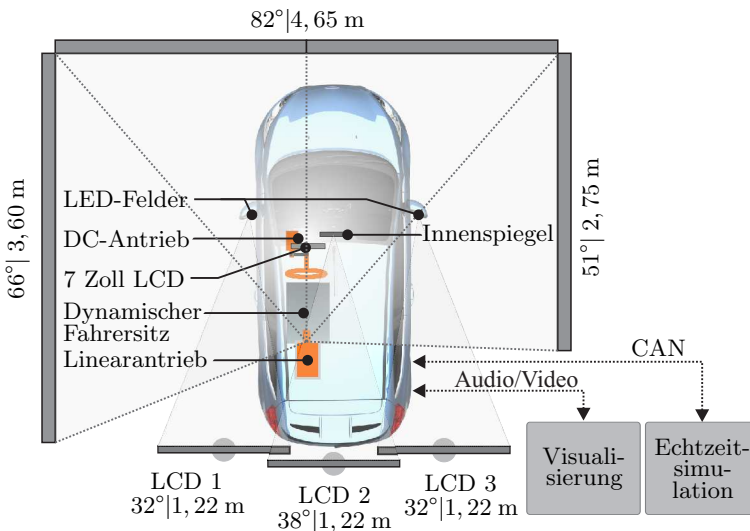


Abbildung 6.1: Gesamtarchitektur des verwendeten Ford Fiesta-Fahrsimulators

sich eine Bildgröße von 2,60 x 2,00 m bei 1400 x 1050 Pixeln. Der resultierende Frontvisualisierungswinkel aus der Fahrerperspektive beträgt 190 Grad.

Die Heck- und Spiegelansichten werden mit drei 55 Zoll-LCDs mit einer Auflösung von jeweils 1920 x 1080 Pixeln realisiert. Durch die Integration eines 7 – Zoll-LCD-Monitors im Fahrzeugcockpit können die in Kapitel 5 eingeführten Fahrerwarn- und Informationskonzepte umgesetzt werden.

In Abbildung 6.2 wird der verwendete Fahrsimulator aus der Fahrerperspektive gezeigt. In dieser Darstellung wird der hohe Immersionsgrad deutlich.

### 6.1.2 FAS- und Simulations-Parameter

Für die Echtzeitsimulation wird ein komplexes nichtlineares MKS-Fahrzeugmodell nach Schramm u. a. (2010a) mit den Parametern aus Tabelle A.2 und den nicht-linearen PACEJKA-Kennlinien aus Abbildung 4.2 verwendet. Die Parametrierung des integralen Querverföhrungsassistentensystems erfolgt wie in Kapitel 5 beschrieben.



Abbildung 6.2: Fahrerarbeitsplatz im Ford Fiesta-Fahrsimulator

Um den Spurwechselassistenten testen zu können, wird der virtuelle Umgebungsverkehr so parametrisiert, dass die Fahrzeuge auf der linken Fahrspur deutlich schneller fahren ( $140 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ) als die Fahrzeuge auf der rechten Fahrspur ( $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ). So können kritische Fahrsituationen beim Spurwechsel provoziert werden.

### 6.1.3 Szenario und Streckenverlauf

Die Fahrstudie wurde auf dem in Abbildung 6.3 gezeigten Abschnitt der Autobahn A40 zwischen Kreuz Kaiserberg und der Ausfahrt Essen-Zentrum durchgeführt.

Diese Strecke verbindet die beiden Campus der Universität Duisburg-Essen und wurde im Rahmen dieser Arbeit mit einem GPS-Messgerät vermessen und dann, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, rekonstruiert. Die Strecke ist 15,4 km lang und hat einen minimalen Bahnradius von 560 m, was einer maximalen Bahnkrümmung von  $0,001785 \frac{1}{\text{m}}$  entspricht.

Sowohl der Streckenverlauf als auch die charakteristischen Schallschutzwände wurden modelliert. Diese Strecke stellt einen typischen Autobahnabschnitt für den Einsatz des entwickelten FAS dar. Die virtuelle Strecke im Fahrstudie wird in Abbildung 6.3 rechts unten gezeigt.

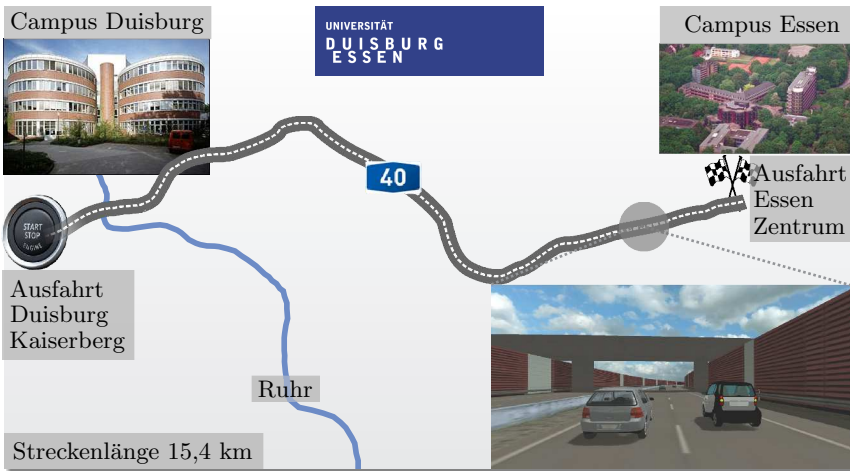


Abbildung 6.3: Streckenerstellung der verwendeten virtuellen Teststrecke

Fahrbahnquerschnitt

Abbildung 6.4 zeigt den verwendeten Fahrbahnquerschnitt nach [FGSV \(1996\)](#) RQ 29,5. Die Autobahn ist in beiden Fahrtrichtungen zweispurig ausgelegt. Dies entspricht der grundsätzlichen Charakteristik der Bundesautobahn A40 auf dem betrachteten Abschnitt. Die beiden Fahrspuren haben jeweils eine Fahrspurbreite von  $b_S = 3,75\text{ m}$ , was ca. 263 % der Fahrzeugspurweite entspricht.

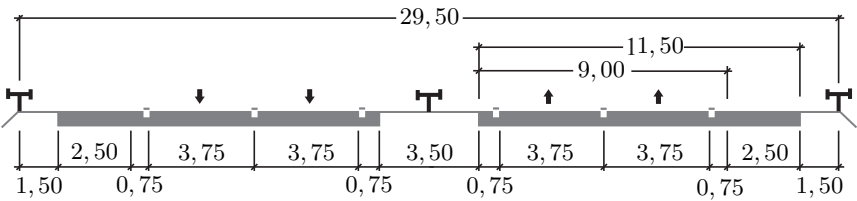


Abbildung 6.4: Fahrbahnquerschnitt nach [FGSV \(1996\)](#) RQ 29,5

6.2 Versuchsdurchführung

Die Simulator-Probandenstudie wurde mit insgesamt 21 Probanden durchgeführt. In Tabelle 6.1 werden die Eckdaten der Stichprobe zusammenfassend dargestellt. Die Stichprobe ist in Hinblick auf das Geschlecht sehr ausgeglichen. Die Fahrerfahrung zeigt sowohl im Hinblick auf die Jahreskilometer als auch die Fahrerfahrung in Jahren ein weites Spektrum.

Kenngröße	Durchschnitt	Maximum	Minimum
Alter	32	66	19
Jahreskilometer	17.708	35.000	100
Fahrerfahrung in Jahren	17,5	48	2
Erfahrung mit FAS	84 % ja / 16 % nein		
Geschlecht	47 % weiblich/53 % männlich		

Tabelle 6.1: Eckdaten der in der Simulatorstudie verwendeten Stichprobe

Die Probanden werden im Vorfeld über die Funktionsweise des integralen Querführungsassistenzsystems in Form einer Präsentation und Einweisung am Fahrzeug informiert. Bevor der Versuch beginnt, bekommen die Probanden in einer

Testfahrt die Möglichkeit, sich mit dem Simulator vertraut zu machen. Aufgrund der fehlenden Fahrzeugdynamik (translatorische und rotatorische Beschleunigungen) ist die Erfüllung der grundlegenden Fahraufgabe für Menschen ohne Simulatorerfahrung zunächst ungewohnt. Die Eingewöhnungszeit kann individuell stark variieren. Erst wenn der Proband mit dem Simulator vertraut ist, beginnt der eigentliche Versuch.

### 6.2.1 Fahraufgabe

Die Probanden bekommen die Aufgabe, mit einer Geschwindigkeit von  $v^{\text{CG}} = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  zu fahren. Die Geschwindigkeit wird im Head-Up-Display dargestellt. Die Fahrtdauer beträgt unter der Annahme einer exakten Geschwindigkeitsregelung des Fahrers demnach etwa 9 Minuten und 24 Sekunden. Weiterhin sollen die Probanden grundsätzlich auf der rechten Fahrspur fahren und nur, wenn ein Fahrzeug auf der rechten Fahrspur langsamer als die geforderte Geschwindigkeit von  $v^{\text{CG}} = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  fährt, zum Spurwechsel ansetzen, überholen und dann wieder zurück auf die rechte Fahrspur wechseln.

Im sogenannten *Baseline*-Versuch fahren die Probanden zunächst mit ihrer Fahraufgabe und ohne die Unterstützung der FAS-Systeme die in Abbildung 6.3 gezeigte virtuelle Strecke ab. Im zweiten Versuch fahren die Probanden die Strecke noch einmal mit dem aktivierten Querführungsassistenzsystem.

## 6.3 Versuchsauswertung und Postprocessing

Die Auswertung der Simulatorversuche erfolgt mit klassischen Methoden der empirischen Forschung, wie in Backhaus u. a. (2008), Raitchel (2008) oder beispielsweise Flick u. a. (2009) beschrieben. Es soll sowohl aus rein technischer Sicht als auch auf Basis des individuellen subjektiven Empfindens die Systemleistung bewertet werden. Hierzu gehört zum einen die Verbesserung der Fahrzeugsicherheit und des Fahrkomforts, zum anderen ist bei menschenzentrierten FAS die Frage nach der Bevormundung des Fahrers durch das FAS von entscheidender Bedeutung.

### 6.3.1 Quantitative Analyse

Die quantitative Analyse ermöglicht eine objektive Aussage über die Systemleistung im Hinblick auf Fahrsicherheit und -komfort zu treffen. Dazu wird während



der Studie eine Vielzahl von Messdaten, die für das FAS relevant sind, aufgezeichnet. Als Beispiel seien hier genannt

- die Fahrspur-Querabweichung in der Fahrspur  $\tilde{y}$  sowie deren zeitliche Ableitung  $\dot{\tilde{y}}$ ,
- die Fahrspur-Winkelabweichung  $\tilde{\psi}$ ,
- das Fahrerhandmoment  $M_{\text{Fahrer}}$  und die Hands-Off-Überwachung,
- das Assistenzmoment am Lenkrad  $M_{\text{Assist, res}}$  sowie die zeitliche Änderung  $\dot{M}_{\text{Assist, res}}$ ,
- der Lenkradwinkel  $\delta_L$  sowie die zeitliche Ableitung  $\dot{\delta}_L$ ,
- die Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers,
- die Relativposition des Umgebungsverkehrs zum Ego-Fahrzeug und die zugehörigen zeitlichen Ableitungen,
- das Spurwechselgefahrenpotential,
- die Anzahl der Spurwechselkollisionen,
- die  $TLC$ ,
- die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v^{\text{CG}}$ ,
- die Längs- und Quereschleunigungen  $a_x^{\text{CG}}, a_y^{\text{CG}}$ ,
- die visuellen und
- die akustischen Fahrerinformationen.

### 6.3.2 Bahnführungsassistent

Zur Auswertung werden in Abhängigkeit der betrachteten Messgröße der Mittelwert, die Minimal- und Maximalwerte, die Standardabweichung ( $1\sigma$ -Umgebung) und weiter von den Messdaten ableitbare Kenngrößen verwendet. An dieser Stelle sei erwähnt, dass für die Berechnung der mittleren Fahrspur-Querabweichung der Zeitraum des Spurwechsels nicht in die Berechnung einbezogen wird. Dies wird durch die Betätigung des Blinkers erkannt. Weiterhin werden nur die Bereiche betrachtet, in denen das Fahrzeug schneller als  $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  fährt, um ein identisches Verhältnis der Messdaten mit aktivem und deaktiviertem Bahnführungsassistenten zu gewährleisten.

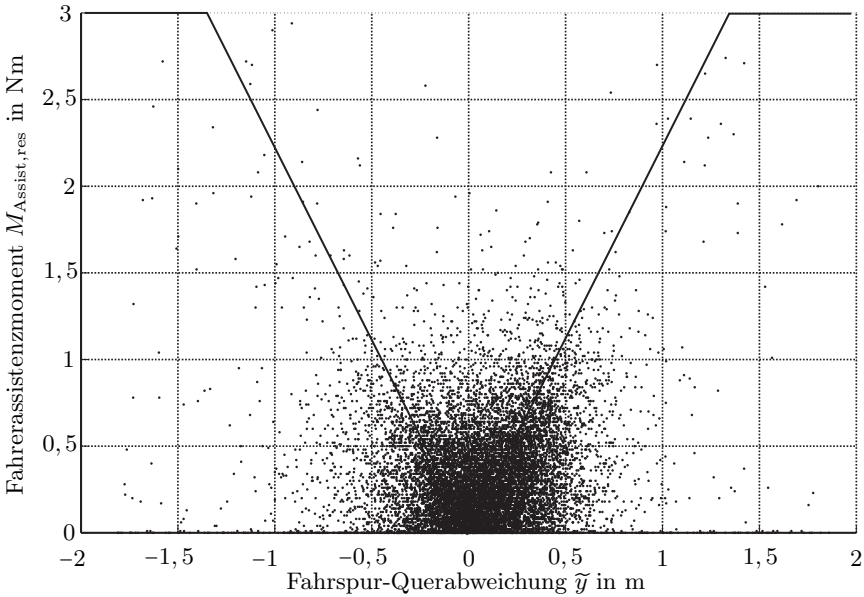


Abbildung 6.5: Darstellung der im Verlauf der Studie auftretenden Überlagerungsmomente

In Abbildung 6.5 werden alle während der Probandenstudie aufgetretenen Assistenzmomente  $M_{\text{Assist, res}}$  in Abhängigkeit der Querabweichung des Fahrzeugs in der Fahrspur  $\tilde{y}$  gezeigt.

Die durchgezogene schwarze Linie repräsentiert das Assistenzmoment des Bahnführungsassistenten bei einem Fahrermoment von  $M_{\text{Fahrer}} = 0 \text{ Nm}$  und einer Winkelabweichung von  $\tilde{\psi} = 0 \text{ deg}$ . Hier zeigt sich deutlich, dass die tatsächlich gestellten Überlagerungsmomente am Lenkrad tendenziell sehr gering sind. Der Mittelwert über alle Messungen mit aktiviertem Bahnführungsassistent liegt bei  $\overline{M}_{\text{Assist, res}} = 0,3597 \text{ Nm}$ . Die zusätzliche physische Belastung für den Fahrer bleibt somit sehr gering.

In Abbildung 6.6 werden die mittleren Quer- und Winkelabweichungen für alle Probanden verglichen. Dabei zeigt sich, dass der Bahnführungsassistent die mittlere Querabweichung um 49 % und die mittlere Winkelabweichung um 47 % reduziert.

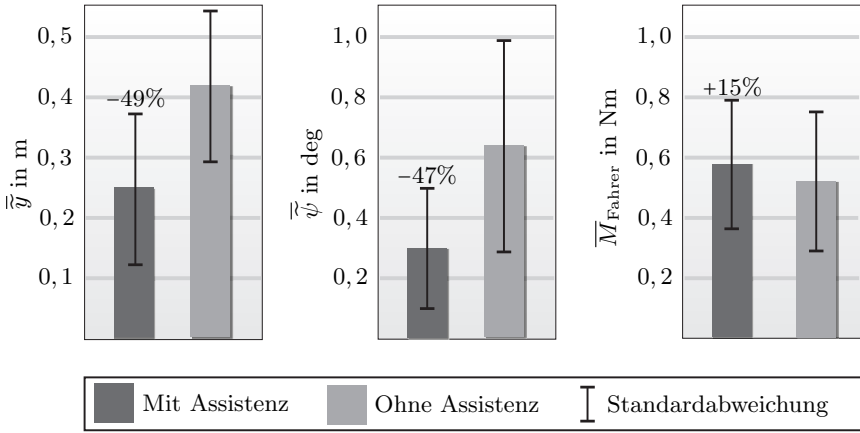


Abbildung 6.6: Auswertung der charakteristischen Kenngrößen für die Spurführungsaufgabe

Bei aktiviertem Bahnführungsassistenten zeigt sich eine leichte Erhöhung des mittleren Lenkmomentes um 15 %. Dies ist darin zu begründen, dass die Probanden lediglich eine sehr kurze Eingewöhnungsphase im Hinblick auf die Wirkungsweise des Bahnführungsassistenten zur Verfügung hatten, was sich gerade zu Beginn des jeweiligen Versuchs in einer Fahrerhandmomentüberhöhung abzeichnet. Das System ist zunächst ungewohnt, es zeigt sich jedoch in der überwiegenden Anzahl der Messungen, dass der Bahnführungsassistenten nach kurzer Zeit akzeptiert wird und der Fahrer der Assistenz folgt. Hierdurch reduziert sich dann das Fahrerhandmoment. Weiterhin zeichnet sich eine Fahrerhandmomentüberhöhung genau dann ab, wenn der Fahrer zum Spurwechsel ansetzt, jedoch noch nicht den Blinker betätigt hat. Dies hat zur Folge, dass der Fahrer zunächst das Assistenzmoment übersteuert, um den Spurwechsel einzuleiten.

Die mittlere mechanischen Fahrerlenkleistung der  $n_P$  Probanden

$$\bar{P}_{\text{Fahrer}} = \frac{\sum_{k=1}^{n_P} |(M_{\text{Fahrer}}(k) \dot{\delta}_L(k))|}{n_P} \quad (6.1)$$

erhöht sich bei eingeschaltetem Bahnführungsassistenten von 0,0569 auf 0,0463 W um 19 %. Der Fahrer muss also im Durchschnitt weniger Korrekturen in der Lenkung vornehmen, um der Fahrspur zu folgen.

### 6.3.3 Cluster-Analyse

In Abbildung 6.7 wird die Clusteranalyse nach männlichen und weiblichen Probanden vorgestellt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse für die Reduzierung der mittleren Querabweichung nahezu identisch sind. Bei den männlichen Probanden wird die relative Winkelabweichung tendenziell mehr reduziert. Der größte Unterschied zeichnet sich bei der Erhöhung des Fahrerlenkmoments ab. Die weiblichen Probanden akzeptieren das Bahnführungsassistenzmoment offensichtlich wesentlich schneller.

Während der Studie wurden durchschnittlich 66,37 Spurwechsel pro Proband durchgeführt. Dies verdeutlicht, dass die im Folgenden dargestellte Auswertung auf Basis des subjektiven Empfindens auch die repräsentative Bewertung des Spurwechselassistenten ermöglicht.

### 6.3.4 Subjektive und qualitative Analyse

Die folgende Analyse der Probandenstudie soll im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden, um die subjektive Bewertung des entwickelten Querführungsassistentensystems und des Fahrsimulators zu ermöglichen. Dazu wird der in Anhang A.4 gezeigte Fragebogen verwendet.

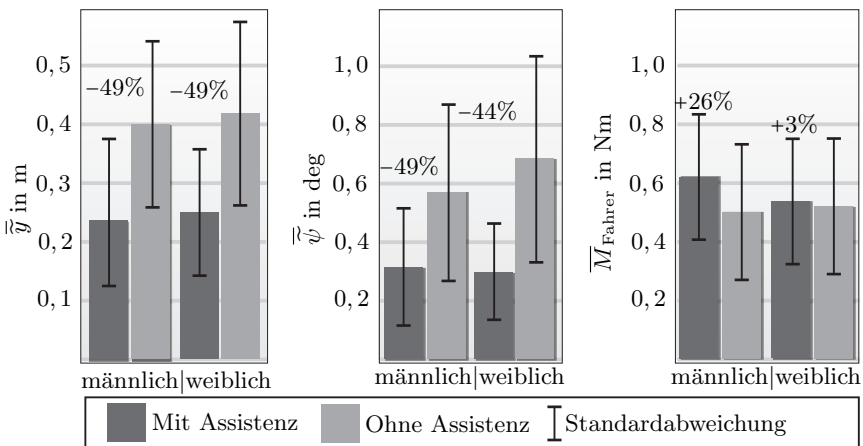


Abbildung 6.7: Cluster-Analyse der charakteristischen Kenngrößen für die Spurführungsaufgabe

Im Fragebogen werden zunächst einige grundlegende Informationen über den Probanden abgefragt. Dies ist besonders im Hinblick auf die Bewertung der verwendeten Stichprobe und die Möglichkeit zur Durchführung einer Clusteranalyse wichtig. Im weiteren Verlauf schließen sich Fragen zum Fahrsimulatoraufbau an. Diese sollen genutzt werden, um den Simulator kontinuierlich weiter zu entwickeln und um im Einzelfall bewerten zu können, ob eine Probandenmessung aufgrund von Kinetose oder aus anderen Gründen verworfen werden muss.

Die Bewertung des Querführungsassistentensystems erfolgt dann im Anschluss separiert nach dem Bahnführungsassistenten, dem Spurverlassensassistenten und dem Spurwechselassistenten. Je nach Fragestellung müssen die Probanden eigene Angaben machen, eine absolute Aussage treffen oder sich einer Polaritätsanalyse unterziehen.

Als Ergebnis können die Gestaltung der visuellen, akustischen und haptischen Interaktionskanäle (MMS) bewertet und verbessert werden. Insbesondere die Gestaltung der haptischen Interaktion über den aktiven Eingriff im Lenkrad kann dazu führen, dass der Fahrer sich durch das System bevormundet fühlt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Fragestellung, ob der Fahrer durch die Vielzahl von zusätzlichen Informationen mental überfordert wird oder ob er in der Lage ist, diese wie gewünscht zu verarbeiten.

Der grundsätzliche Eindruck im Hinblick auf den verwendeten Fahrsimulator sowie das getestete Querführungsassistentensystem sind in Abbildung 6.8 gezeigt. Die Position der grauen Marker symbolisiert den Mittelwert aus der analysierten Stichprobe, die schwarzen Marker kennzeichnen die  $1\sigma$ -Standardabweichung. Keiner der Probanden hat über Kinetose im Verlauf der Simulatorfahrt geklagt, lediglich der Schulterblick nach links hat in Einzelfällen zu einem leichten „Schwindel-

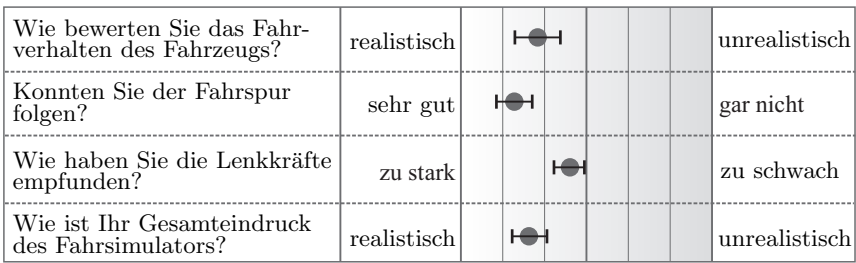


Abbildung 6.8: Auswertung der Basisfragen zum Fahrsimulatorversuch

Wie stark haben Sie die Rückmeldung des BA erfahren?	gar nicht						sehr stark
Hat sich das Fahrverhalten durch den BA verändert?	gar nicht						sehr stark
Wie bewerten Sie die Unterstützung des BA auf der AB?	sehr hilfreich						störend
Haben Sie sich durch den Lenkeingriff gestört gefühlt?	gar nicht						sehr stark
Konnten Sie der Fahrspur mit BA sicherer folgen?	sicherer						unsicherer
Wie haben Sie den Eingriff des BA am Lenkrad empfunden?	verständlich						unverständlich
Wie sollte das Überlagerungsmoment gestaltet sein?	stärker						schwächer
Wie stehen Sie zu der Aussage: „Ich wurde gefahren!“	ich stimme zu						ich stimme nicht zu

Abbildung 6.9: Auswertung der Fragen zum Bahnführungsassistenten

gefühl“ geführt. Dies liegt darin begründet, dass die Visualisierung des Bereichs links neben dem Fahrzeug verhältnismäßig nah am Fahrerarbeitsplatz ist und der Bildfluss hier extrem schnell ist.

Die Qualität bzw. der Realitätsgrad des Simulators, des Fahrzeugverhaltens sowie die Möglichkeit zur Durchführung der Bahnführungsaufgabe wurden überdurchschnittlich positiv bewertet. Das wird auch durch das Zitat „Ich hab mich wie in einer realen Fahrsituation gefühlt“ einer 59-jährigen Frau bestätigt. Insbesondere der hohe Blickwinkel im Simulator-CAVE ermöglicht diesen hohen Immersionsgrad. Die Bewertung des synthetisierten Lenkmoments liegt nahe der Mittellage, so dass die Aussage getroffen werden kann, dass die Lenkungsauslegung einer durchschnittlichen Fahrzeuglenkung entspricht.

### Fragebogen zum Bahnführungsassistenten

In Abbildung 6.9 werden die zentralen Aussagen bezüglich des Bahnführungsassistenten zusammengefasst. Auch hier wird wieder der Mittelwert sowie die Standardabweichung aller Probanden als Messwerkzeug gewählt und im Hinblick auf das menschliche Empfinden des FAS zusammenfassend dargestellt.

Die Unterstützung durch das kontinuierliche Assistenzmoment vermittelt den Probanden ein deutlich gesteigertes Sicherheitsgefühl. Die Gestaltung des Assistenzmoments wird als verständlich empfunden, wobei die Stärke des Moments im Mittel angenehm gestaltet zu sein scheint. In einigen Ausnahmefällen haben die Probanden über einen zu hohen Lenkmomentgradienten bzw. einen Lenkmomentruck geklagt, wenn das System nach einem durchgeführten Spurwechsel wieder aktiv wird.

Das Assistenzmoment bleibt auch fünf Sekunden nach dem Ausschalten des Blinkers deaktiviert, damit der Fahrer den Spurwechsel bei einmaligem Antippen des Blinkers komfortabel gestalten kann. Es entstehen somit jedoch Situationen, in denen der Fahrer bereits den Spurwechsel abgeschlossen hat, das Assistenzmoment jedoch erst einige wenige Sekunden später wieder verfügbar ist. Hier könnte das Assistenzmoment bereits frühzeitig wieder aktiviert werden, sobald der Spurwechsel erfolgreich abgeschlossen ist.

Insgesamt fühlen sich die Probanden durch den Lenkeingriff tendenziell weder gestört noch bevormundet.

Fragebogen zum Spurverlassensassistenten

Die Ergebnisse der subjektiven Bewertung des Spurverlassensassistenten können Abbildung 6.10 entnommen werden.

Das System wird insgesamt als sehr hilfreich empfunden. Es zeigt sich jedoch, dass die Stärke der haptischen Interaktion, also der Maximalwert der Drehmomentvibration tendenziell als zu schwach empfunden wird. Da eine Vielzahl der Probanden gar nicht erst in die Situation eines unbeabsichtigten Spurverlassens gekommen ist, können für die folgenden Auswertungen lediglich acht Probanden

Wie sollte die Vibration am Lenkrad gestaltet werden?	stärker		aus- geschaltet
Wie haben Sie die haptische Rückmeldung des SVA erfahren?	gar nicht		sehr stark
Wie bewerten Sie die Unterstützung des SVA?	sehr hilfreich		störend

Abbildung 6.10: Auswertung der Fragen zum Spurverlassensassistenten

herangezogen werden. Dies bestätigt jedoch im Gegenzug nochmals die Verbesserung der Spurfolgegüte durch den Bahnführungsassistenten.

Fragebogen zum Spurwechselassistenten

Die in Abbildung 6.11 gezeigte Analyse des Spurwechselassistenten zeigt, dass die Lumineszenz der Dioden im Mittel als sehr gut abgestimmt bewertet wird. Auch die Zuordnung des durch die Dioden repräsentierten Spurwechselgefahr-Eskalationslevels war in den meisten Fällen problemlos möglich. Der Sicherheitszugewinn wird im Mittel überdurchschnittlich positiv durch die Probanden bewertet.

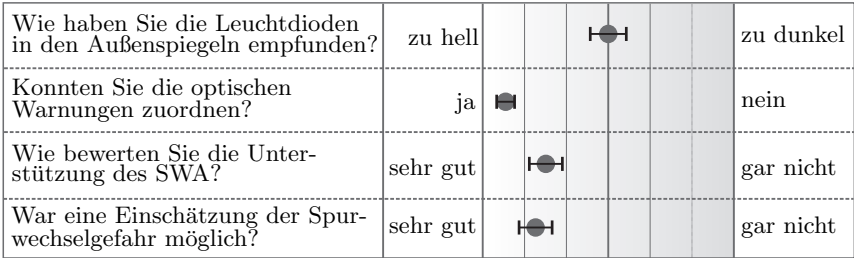


Abbildung 6.11: Auswertung der Fragen zum Spurwechselassistenten

Bewertung der Interaktionskanäle (MMS)

Eine Bewertung der Zuordnung der angebotenen Assistenz auf dem visuellen, akustischen und haptischen Kanal wird in Abbildung 6.12 gezeigt. Die Zuordnung der akustischen und haptischen Assistenz erfolgt im Mittel mit einer sehr hohen Güte. Abschließend lässt sich schlussfolgern, dass die menschenzentrierte Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle auf einem sehr hohen Niveau ist.

Fragebogen zur Zahlungsbereitschaft

Abschließend werden die Ergebnisse der Befragung zu der potentiellen Zahlungsbereitschaft der Probanden in Abbildung 6.13 ausgewertet. Die Probanden konnten ihre Bewertung separat für den Spurverlassens-, den Spurwechsel- und den Bahnführungsassistenten in insgesamt vier Preiskategorien durchführen. So kann







---

## Zusammenfassung, wissenschaftlicher Beitrag und Ausblick

---

### 7.1 Zusammenfassung und wissenschaftlicher Beitrag

Fahrerassistenzsysteme leisten einen großen Beitrag für die sicherere und komfortablere Gestaltung zukünftiger Fahrzeuge. Diverse Fahrerassistenzsysteme sind bereits auf dem Markt verfügbar. Der Automatisierungsgrad der Systeme ist bisher jedoch noch vergleichsweise gering. Insbesondere im Bereich der Querführungsassistenz auf der Bahnführungsebene sind vorwiegend rein warnende Systeme verfügbar. Aus technischer Sicht und vor allem vor dem Hintergrund elektrischer Lenksysteme können jedoch gerade im Bereich der Querführungsassistenz Systeme eingesetzt werden, die weit über eine reine Warnung hinausgehen und dadurch einen weiteren Sicherheits- und Komfortgewinn versprechen. Der steigende Ausrüstungsgrad moderner Fahrzeuge mit Fahrerassistenzsystemen erhöht jedoch auch die mentale Belastung für den Fahrer. Der Mensch muss zusätzlich zu seiner Fahraufgabe immer mehr Informationen verarbeiten, die im schlechtesten Fall zu einer Überforderung führen. Die Gestaltung der Kommunikations- und Interaktionskanäle zwischen Mensch und Fahrzeug bekommt daher eine größere Bedeutung. Neben der technischen Funktionalität müssen zunehmend auch

die menschlichen Bedürfnisse in den Entwicklungsprozess integriert und für die spätere Systemgestaltung berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept zur Entwicklung von menschenzentrierten Fahrerassistenzsystemen vorgestellt. Weiterhin wurde die durchgängige Entwicklung eines innovativen Querführungsassistenzsystems – bestehend aus einem Spurverlassens-, Bahnführungs- und Spurwechselassistenten – bis zum Prototypenstadium durchgeführt.

In Kapitel 2 wird zunächst eine Übersicht des Entwicklungsprozesses aktueller Fahrerassistenzsysteme auf der Bahnführungsebene vorgestellt. Die Kategorisierung sowie die wichtigsten Aspekte sind hier die zentralen Themen. Insbesondere wird der Einsatz von Fahrsimulatoren anhand aktueller Beispiele fokussiert. Weiterhin erfolgt die Einführung grundlegender Besonderheiten der menschlichen Physiologie in Hinblick auf die Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und angewendete Fahrsimulatorkonzept wird in Kapitel 3 beschrieben. Wichtigstes Ziel ist die Integration des Fahrers und realer Systemkomponenten in den Entwicklungsprozess. Insbesondere für die Evaluierung des entwickelten Querführungsassistenzsystems werden ein hoher Immersionsgrad und die Verfügbarkeit der gesamten Systemfunktionalität realisiert.

In Kapitel 4 erfolgt die modellbasierte Auslegung des Querführungsassistenzsystems. Ein neues Konzept zur Vorauslegung aktiver Fahrerassistenzsysteme wird vorgestellt. Dazu wird sukzessive ein Gesamtmodell, bestehend aus Fahrer- und Fahrzeugmodell, Assistenzsystem und Interaktionsmodell hergeleitet. Dies ermöglicht bereits sehr früh die Integration des menschlichen Verhaltens in der Systemauslegung. Durch geeignete Optimierungsalgorithmen werden die Assistenzparameter bestimmt und die Systemstabilität abgesichert. Der Spurwechselassistent wird zusätzlich durch die Simulation charakteristischer Manöver ausgelegt und evaluiert.

Die Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle sowie die Fusion der drei zunächst separat entwickelten Systeme zu dem menschenzentrierten Querführungsassistenzsystem wird in Kapitel 5 durchgeführt. Die Auswahl der Interaktionskanäle sowie die Berücksichtigung der aktuellen Fahrerintention sind ein zentrales Thema. Für den Bahnführungs- und Spurverlassensassistent wird ein Überlagerungsmoment am Lenkrad, für den Spurwechselassistent ein innovatives LED-Feld im Außenspiegel realisiert. Die Fahrerintentionserkennung mit einem Fah-

rerhandmomentbeobachter auf Basis eines KALMAN-Filters ist ebenfalls Thema des Kapitels.

In Kapitel 6 wird die Systemevaluierung in einer empirischen Fahrsimulatorstudie durchgeführt. Hierzu erfolgt zunächst die Beschreibung des verwendeten Simulatoreaufbaus. Die Rekonstruktion eines realen Autobahnabschnitts zu einer virtuellen Teststrecke garantiert die Verfügbarkeit eines realistischen Versuchsszenarios. Die Studie wird quantitativ durch die Messung charakteristischer Kenngrößen und subjektiv mit einem Fragebogen ausgewertet. Aus technischer Sicht verbessert das Querführungsassistenzsystem die Bahnführung des Fahrzeugs erheblich. Die mittlere Spurabweichung des Fahrzeugs kann halbiert werden. Das benötigte Fahrerlenkmoment steigt hingegen leicht. Dieser Effekt kann verstärkt bei den männlichen Probanden identifiziert werden. Die Gestaltung der Interaktionskanäle wird insgesamt als positiv empfunden. Der Eindruck einer Bevormundung kann nur in Einzelfällen erkannt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein innovatives Fahrerassistenzsystem bis zum Prototypenstadium entwickelt wurde, dass sowohl den menschlichen Bedürfnissen Rechnung trägt als auch die Sicherheit und den Komfort erheblich verbessert.

## 7.2 Ausblick

Diese Arbeit hat eine Basis geschaffen, von der aus verschiedene theoretische und experimentelle Forschungsaktivitäten gestartet werden können. In weiterführenden Arbeiten kann sowohl die Methode zur Entwicklung von Querführungsassistenzsystemen auf der Bahnführungsebene als auch das Fahrsimulatorkonzept erweitert werden.

Insbesondere die Modellierung des Fahrers und die Cluster-Entwicklung für unterschiedliche Fahrertypen sind interessante Forschungsgebiete. Auch das Interaktionsmodell zwischen Fahrer und Assistenzsystem kann um zusätzliche Faktoren, die auch die Fahrerintention und Fahrsituation umfassen, erweitert werden, so dass ein situationsadaptives Modell entsteht. Um den Immersionsgrad des Fahrsimulators weiter zu erhöhen, ist in zukünftigen Projekten auch das vestibuläre Empfinden des Menschen einzubeziehen. Dazu wird ein dynamischer Fahrsimulator entwickelt. Auch die verfügbaren Messeinrichtungen im Hinblick auf das physiologische Verhalten des Menschen können zukünftig um Systeme wie Eye-Tracker (Augenbewegung, Blickrichtung) und Kameras erweitert werden, um die Auswertungsmöglichkeiten zukünftiger Simulatorstudien zu erweitern.

Im Hinblick auf das entwickelte Querführungsassistenzsystem schließt sich nun die Erprobung in einem realen Prototypenfahrzeug in Kooperation mit Zulieferern oder OEMs an. Die Weiterentwicklung des Systems zu einem vollautonomen Querführungsassistenten, der sowohl die Bahnführungs- als auch die Spurwechselaufgabe übernehmen kann, ist denkbar. An dieser Stelle gilt es, die Wiener Konvention und weitere produkthaftungsrechtliche Aspekte zu beachten.

# ANHANG A

---

## Anhang

---

### A.1 Parameter für die Spurwechseltrajektorie

$$a_{S9} = 0,000045245207412 \quad (\text{A.1})$$

$$a_{S8} = -0,001284670466348 \quad (\text{A.2})$$

$$a_{S7} = 0,014251438120246 \quad (\text{A.3})$$

$$a_{S6} = -0,076250368012603 \quad (\text{A.4})$$

$$a_{S5} = 0,192226721250232 \quad (\text{A.5})$$

$$a_{S4} = -0,179223411802296 \quad (\text{A.6})$$

$$a_{S3} = 0,050235045703358 \quad (\text{A.7})$$

$$(\text{A.8})$$

A.2 Parameter des Audi A8 D2

Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert
$c_{\alpha}^v$	Schräglaufsteifigkeit vorne	$\frac{N}{rad}$	128690
$c_{\alpha}^h$	Schräglaufsteifigkeit hinten	$\frac{N}{rad}$	176540
$EG$	Eigenlenkgradient	$\frac{rad \cdot s^2}{m}$	0,0041
$m$	Fahrzeugmasse	kg	1974
$J_z$	Gierträgheitsmoment	$kgm^2$	2799
$l_v$	Abstand Schwerpunkt-Vorderachse	m	1,22
$l_h$	Abstand Schwerpunkt-Hinterachse	m	1,66
$i_L$	Lenkübersetzung	–	15,7
Reifentyp	Dunlop SP Sport 900   225/45 R18 103Y		
$s$	Fahrzeugspurweite	m	1,59
$v_{ch}$	Charakteristische Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$	26,48

A.3 Reglerparameter der Bahnführungsassistentensysteme

Parameter	Wert
$k_{I\psi}$	0,02
$k_{P\psi}$	0,3
$K_{D\psi}$	0,14
$T_{1\psi}$	1,7
$k_{Py0}$	21
$k_{Dy0}$	3
$k_{Py}$	0,5
$k_{Dy}$	0,5
$T_{1y}$	1,7
$k_{\psi}$	38
$k_p$	1600



## A.4 Fragebögen zur Fahrsimulatorstudie



### Fragebogen zum Querführungsassistenzsystem

Datum		
Probandennummer		
Alter	Jahre	
Geschlecht	männlich <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> weiblich
Datum der Führerscheinprüfung		
Jährlich gefahrene Kilometer	km	
Fahrstil	sportlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	passiv
Wie bewerten Sie das Fahrverhalten des Fahrzeugs?	realistisch <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	unrealistisch
Konnten Sie der Fahrspur folgen?	sehr gut <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	überhaupt nicht
Wie haben Sie die Lenkkräfte empfunden?	zu stark <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	zu schwach
Wie ist Ihr Gesamteindruck des Fahrsimulators?	realistisch <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	unrealistisch
Haben Sie bereits Erfahrungen mit Fahrerassistenzsystemen im realen Fahrzeug gemacht? (z. B.: ABS, ESP, ACC, LKA, ..)	ja <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> nein
Falls ja, mit welchen Fahrerassistenzsystemen?		

<b>Bahnführungsassistent</b>			
Wussten Sie vor dem heutigen Tag, was ein <b>Bahnführungsassistent</b> macht?	Ja <input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> Nein
Haben Sie das Agieren des <b>Bahnführungsassistenten</b> während der Fahrt bemerkt?	Ja <input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> Nein
Wie stark haben Sie die Rückmeldung des <b>Bahnführungsassistenten</b> erfahren?	gar nicht <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		sehr stark <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Hat sich das Fahrverhalten des Fahrzeugs, also die Reaktion auf Ihre Lenkeingabe, nach Aktivierung des <b>Bahnführungsassistenten</b> merklich verändern?	gar nicht <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		sehr stark <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Wie bewerten Sie die Unterstützung des <b>Bahnführungsassistenten</b> bei der Fahrt auf der Autobahn?	sehr hilfreich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Haben Sie sich durch den Lenkeingriff des Systems gestört gefühlt?	gar nicht <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		sehr stark <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Haben Sie sich durch das <b>Bahnführungsassistenzsystem</b> sicherer gefühlt?	unbedingt <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		eher unsicherer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Wie haben Sie den Eingriff des <b>Bahnführungsassistenten</b> am Lenkrad empfunden?	verständlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		unverständlich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Wie sollten die Überlagerungskräfte/ -momente am Lenkrad gestaltet sein?	stärker <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		weniger stark <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Wie ist Ihre Meinung zu dem Statement: „Ich wurde vom Fahrzeug gefahren!“	Ich stimme zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		Ich stimme nicht zu <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Wie bewerten Sie die Unterstützung des <b>Bahnführungsassistenten</b> im Straßenverkehr?	hilfreich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Angenommen, Sie sind auf der Suche nach einem neuen Fahrzeug. Der <b>Bahnführungsassistent</b> wird Ihnen optional angeboten. Welchen Preis wären Sie bereit, für den Spurwechselassistenten zu zahlen?	<input type="checkbox"/> 0 €	<input type="checkbox"/> 0-300€	<input type="checkbox"/> 300-1000€
<input type="checkbox"/> >1000€			
Haben Sie Vorschläge zur Verbesserung des Systems?			

<i>Spurverlassensassistent</i>				
Wussten Sie vor dem heutigen Tag, was ein <i>Spurverlassensassistent</i> macht?	Ja <input type="checkbox"/>		Nein <input type="checkbox"/>	
Hat der <i>Spurverlassensassistent</i> bei Ihrer Simulatorfahrt eingegriffen?	Ja <input type="checkbox"/>		Nein <input type="checkbox"/>	
Konnten Sie den optischen Warnungen dem System und der Situation zuordnen?	Ja <input type="checkbox"/>		Nein <input type="checkbox"/>	
Konnten Sie die Vibrationen am Lenkrad dem System zuordnen?	Ja <input type="checkbox"/>		Nein <input type="checkbox"/>	
Wie stark haben Sie die Rückmeldung des <i>Spurverlassensassistenten</i> erfahren?	gar nicht <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		sehr stark	
Wie bewerten Sie die Unterstützung des <i>Spurverlassensassistenten</i> im Straßenverkehr?	sehr hilfreich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		störend	
Wie sollte die Vibration am Lenkrad gestaltet werden?	stärker <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		ausgeschaltet	
Angenommen, Sie sind auf der Suche nach einem neuen Fahrzeug. Der <i>Spurverlassensassistent</i> wird Ihnen optional angeboten. Welchen Preis wären Sie bereit, für den <i>Spurverlassensassistenten</i> zu zahlen?	<input type="checkbox"/> 0 €	<input type="checkbox"/> 0-300€	<input type="checkbox"/> 300-1000€	<input type="checkbox"/> >1000€
Haben Sie Vorschläge zur Verbesserung des Systems?				

<b>Spurwechselassistent</b>			
Wussten Sie vor dem heutigen Tag, was ein <b>Spurwechselassistent</b> macht?	Ja <input type="checkbox"/>		Nein <input type="checkbox"/>
Hat der <b>Spurwechselassistent</b> bei Ihrer Simulatorfahrt ins Lenkrad eingegriffen?	Ja <input type="checkbox"/>		Nein <input type="checkbox"/>
Konnten Sie den optischen Warnungen dem System und der Situation zuordnen?	Ja <input type="checkbox"/>		Nein <input type="checkbox"/>
Wie haben Sie die Leuchtdioden in den Außenspiegeln empfunden ?	zu hell <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	zu dunkel <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Wie konnten Sie die visuell über die Leuchtdioden transportierte Information über eine Spurwechselgefahr interpretieren ?	sehr gut <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	gar nicht <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Wie sollte die Vibration am Lenkrad gestaltet werden?	stärker <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	ausgeschaltet <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Wie ist Ihr Gesamteindruck vom <b>Spurwechselassistenten</b> ?	hilfreich <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	störend <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Angenommen, Sie sind auf der Suche nach einem neuen Fahrzeug. Der <b>Spurwechselassistent</b> wird Ihnen optional angeboten. Welchen Preis wären Sie bereit, für den <b>Spurwechselassistenten</b> zu zahlen?	<input type="checkbox"/> 0 €	<input type="checkbox"/> 0-300€	<input type="checkbox"/> 300-1000€
<input type="checkbox"/> >1000€			
Haben Sie Vorschläge zur Verbesserung des Systems?			
<b>Gesamtsystem</b>			
Sind Situationen aufgetreten, in denen Sie visuelle/optische Informationen/Assistenz nicht der Situation zuordnen konnten?	oft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Sind Situationen aufgetreten, in denen Sie akustische Informationen/Assistenz nicht der Situation zuordnen konnten?	oft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
Sind Situationen aufgetreten, in denen Sie haptische Informationen/Assistenz nicht der Situation zuordnen konnten?	oft <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	nie <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	

---

## Literaturverzeichnis

---

- [ISO17387] : *ISO 17387: Intelligent transport systems: Lane change decision aid systems (LCDAS) - Performance requirements and test procedures*
- [ISO17361] : *ISO17361: Intelligent transportation systems: Lane departure warning systems – Performance requirements and test procedures*
- [Abel 1991] ABEL, D.: Fuzzy Control - Eine Einführung ins Unscharfe. In: *AT* 12 (1991), S. 433–438
- [Abendroth und Bruder 2009] ABENDROTH, B. ; BRUDER, R.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Kap. Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung, S. 4–14, Vieweg+Teubner, 2009
- [Ameling 2006] AMELING, C.: *Steigerung der aktiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen durch ein Kollisionsvermeidungssystem*, Helmut-Schmidt Universität, Dissertation, 2006
- [Artaud u. a. 2004] ARTAUD, P. ; PLANQUE, S. ; LAVERGNE, C. ; CARA, H. ; LEPINE, P. de ; TARRIERE, C. ; GUEGUEN, B.: An on-board system for detecting lapses of alertness in car driving. In: *14th International Conference of Enhanced Safety for Vehicles*, 2004

- [Ashkens und McRuer 1962] ASHKENS, I. L. ; MCRUER, D. T.: Theory of Handling Qualities Derived from Pilot/Vehicle System Consideration. In: *Aerospace Engineering* 2 (1962)
- [Auckland u. a. 2006] AUCKLAND, R. ; WARREN, M. ; CARSTEN, O.: Dynamic Analysis of Lateral Control Systems. In: *The 8th Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC 2006*, 2006
- [Backhaus u. a. 2008] BACKHAUS, K. ; ERICHSON, B. ; PLINKE, W. ; WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden*. Springer, 2008 (12)
- [Bartels u. a. 2009] BARTELS, A. ; STEINMEYER, S. ; BROSIG, S. ; SPICHALSKY, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Kap. Fahrstreifenwechselassistentz, S. 562–571, Vieweg+Teubner, 2009
- [Batavia 1999] BATAVIA, P.: *Adaptive Lane Departure Warning Systems*, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, Dissertation, 1999
- [Behringer 1996] BEHRINGER, R.: *Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug*, Federal Armed Forces University, Munich, Dissertation, 1996
- [Bender 2008] BENDER, E.: *Handlungen und Subjektivurteile von Kraftfahrzeugführern bei automatischen Brems- und Lenkeingriffen eines Unterstützungssystems zur Unfallvermeidung*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2008
- [Bender u. a. 2007a] BENDER, E. ; DARMS, M. ; SCHORN, M. ; STÄHLIN, U. ; ISERMANN, R. ; WINNER, H. ; LANDAU, K.: Antikollisionssystem Proreta - Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug, Teil 1: Grundlagen des Systems. In: *Automobiltechnische Zeitschrift - ATZ* 4 (2007), S. 336–341
- [Bender u. a. 2007b] BENDER, E. ; DARMS, M. ; SCHORN, M. ; STÄHLIN, U. ; ISERMANN, R. ; WINNER, H. ; LANDAU, K.: Antikollisionssystem Proreta - Der Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug, Teil 2: Ergebnisse. In: *Automobiltechnische Zeitschrift - ATZ* 5 (2007), S. 456–463
- [Bender und Landau 2006] BENDER, E. ; LANDAU, K.: Fahrerverhalten bei automatischen Brems- und Lenkeingriffen eines Fahrerassistenzsystems zur Unfallvermeidung. In: *VDI-Berichte Nr. 1931, Autoreg 2006*, 2006

- [Bertozi u. a. 2000] BERTOZZI, M. ; BROGGI, A. ; FASCIOLI, A.: Vision-Based Intelligent Vehicles: State of the Art and Perspectives. In: *Journal of Robotics and Autonomous Systems* 32 (2000), S. 1–16
- [Brandt 2008] BRANDT, T.: *A Predictive Potential Filled Concept for Shared Vehicle Guidance*, Heinz Nixdorf Institut - Universität Paderborn, Dissertation, 2008
- [Brandt u. a. 2008] BRANDT, T. ; HIESGEN, G. ; HESSE, B. ; SCHRAMM, D. ; BRÖCKER, M. ; HEITZER, H.: Linear Stability and Performance Analysis of Shared Lane Keeping between Driver and Assistance System. In: *Proceedings of 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 2008)*. Kobe, Japan, 2008
- [Börcsök 2000] BÖRCSÖK, J.: *Fuzzy Control - Theorie und Industrieinsatz*. Verlag Technik Berlin, 2000
- [Breuer 2009] BREUER, J.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Kap. Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen, S. 55–68, Vieweg+Teubner, 2009
- [Cemeny und Penerai 2003] CEMENY, A. ; PENERAI, F.: Evaluation Perception in Driving Simulation Experiments. In: *Trends in Cognitive Sciences* 7, 2003
- [Cotter u. a. 2006] COTTER, S. ; HOPKIN, J. ; STEVENS, A. ; BURROWS, A. ; KOMPFFNER, P. ; FLAMENT, M.: The Institutional Context for Advanced Driver Assistance Systems: A Code of Practice for Development / TRL Ltd., UK and Department for Transport, UK and ERTICO, Belgien. 2006. – Forschungsbericht
- [Daimler 2009] DAIMLER: "Attention Assist" warnt vor gefährlichem Sekundenschlaf; Automobilsicherheit: Von der Straße hin zum Fahrer. In: *Sensormagazin* 03 (2009), S. 8–11
- [Dickmanns und Zapp 1986] DICKMANNs, E. ; ZAPP, A.: A curvature-based scheme for improved road vehicle guidance by computer vision. In: *SPI Conference on Mobile Robots*, 1986, S. 161–168
- [Dickmanns u. a. 1994] DICKMANNs, E. D. ; BEHRINGER, R. ; HILDE-BRANDT, T. ; MAURER, M. ; THOMANEK, F. ; SCHIELEN, J.: The Seeing Passenger Car VaMoRs-P. In: *Symposium On Intelligent Vehicles*, 1994
- [DMT 2007] DMT: Roads to the Future: The Assisted Driver / Dutch Ministry of Transport. 2007. – Forschungsbericht

- [Donges 2009] DONGES, E.: *Fahrerverhaltensmodelle*. Kap. 2, S. 15–23, Vieweg+Teubner Verlag, 2009
- [Donges und Naab 1996] DONGES, E. ; NAAB, K.: Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. In: *Automatisierungstechnik* 44(5) (1996), S. 226–236
- [Duden 2002] DUDEN: *Duden: Das große Wörterbuch der deutschen Sprache*. Bd. 3. Bibliographisches Institut, Mannheim, 2002
- [Durkee 2010] DURKEE, S.: *The Effect of Simulation Attributes on Driver Perception and Behavior*, Montana State University, Diplomarbeit, 2010
- [Esch 2010] ESCH, S.: *Modellierung von virtuellem Umgebungsverkehr als Testumgebung für Assistenz- und Kommunikationssysteme mit einem Fahrsimulator*, Universität Duisburg-Essen, Diplomarbeit, 2010
- [EU 06.02.2007] EU: Commission Recommendation of 22 December 2006 on Safe and Efficient In-Vehicle Information and Communication Systems: European Statement of Principles on Human Machine Interface. In: *Official Journal of the European Union* L32/200 (06.02.2007)
- [Feldmann und Hiesgen 2011] FELDMANN, S. ; HIESGEN, G.: Automatisierte Generierung von realitätsgetreuen Umgebungsszenarien für Fahrsimulatoren. In: *3. Wissenschaftforum mobilität*, 2011
- [FGSV 1995] FGSV: Richtlinien für die Anlage von Strassen - Teil Linienführung RAS-L / Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen - Arbeitsgruppe Strassenentwurf. 1995. – Forschungsbericht
- [FGSV 1996] FGSV: Richtlinien für die Anlage von Strassen - Teil Querschnitte RAS-Q / Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen - Arbeitsgruppe Strassenentwurf. 1996. – Forschungsbericht
- [Flick u. a. 2009] FLICK, U. ; KARDORFF, E. von ; STEINKE, I.: *Qualitative Forschung*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2009 (7)
- [Föllinger 1994] FÖLLINGER, O.: *Regelungstechnik*. Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 1994
- [Franke u. a. 2001] FRANKE, U. ; GAVRILA, D. M. ; GERN, A. ; GOERZIG, S. ; JANSEN, R. ; PAETZOLD, F. ; WÖHLER, C.: *Intelligent Vehicle Technologies and Applications*. Kap. From door to door - Principles and applications of computer vision for driver assistance systems, S. 131–188, Butterworth-Heinemann, 2001



- [Franke u. a. 2007] FRANKE, U. ; KNOEPPEL, C. ; LOOSE, H.: Lane Recognition on Country Roads. In: *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, 2007
- [Freyer 2008] FREYER, J.: *Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC*, Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2008
- [Gayko 2005] GAYKO, J.: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Kap. Evaluierung eines Spurhalteassistenten für das "Honda Intelligent Driver Support System", S. 189–202, Springer, 2005
- [Gayko 2009] GAYKO, J.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Kap. Lane Departure Warning, S. 543–553, Vieweg+Teubner Verlag, 2009
- [Hargutt 2000] HARGUTT, V.: Eyelid movements and their predictive value of fatigue stages. In: *3rd International Conference of Psychophysiology in Ergonomics*, 2000
- [Hargutt 2001] HARGUTT, V.: *Das Lidschlagverhalten als Indikator für Aufmerksamkeits- und Müdigkeitsprozesse bei Arbeitshandlungen*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Dissertation, 2001
- [Hesse 2011] HESSE, B.: *Wechselwirkung von Fahrzeugdynamik und Kfz-Bordnetz unter Berücksichtigung der Fahrzeugbeherrschbarkeit*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2011
- [Hesse u. a. 2009a] HESSE, B. ; HIESGEN, G. ; BRANDT, T.: A Multifunctional Tool for Desingning the HMI of Mechatronic Products. In: *Automotive UI* (2009), September
- [Hesse u. a. 2009b] HESSE, B. ; HIESGEN, G. ; BRANDT, T. ; SCHRAMM, D.: Ein Fahrsimulator als Werkzeug zur frühzeitigen Eigenschaftsabsicherung von Mensch-zentrierten mechatronischen Systemen. In: *VDI Mechatronik 2009*, 2009
- [Hiesgen und Schramm 2011] HIESGEN, Gregor ; SCHRAMM, D.: Individuell abgestimmter Fahrsimulator. In: *Unikate* 39 (2011), S. 82–93
- [Hiesgen u. a. 2008] HIESGEN, Gregor ; UNTERREINER, Michael ; HESSE, Benjamin ; BRANDT, Thorsten ; SCHRAMM, Dieter: Ein Werkzeug zur Frühzeitigen Integration des Fahrers in den Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen. In: *24. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz, VDI-Berichte 2048*, 2008

- [Hiesgen 2009] HIESGEN, T.: Virtuelle Testfahrt - Fahr Simulator-Konzept schließt Lücke zwischen Simulation und realen Versuchen mit Prototypen. In: *Automobilkonstruktion - Fachwissen für Entwicklungsingenieure* November (2009)
- [Hochstädter u. a. 2000] HOCHSTÄDTER, A. ; ZAHN, P. ; BREUER, K.: Ein universelles Fahrermodell mit den Einsatzbeispielen Verkehrssimulation und Fahr Simulator. In: *9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2000
- [Hoffmann und Gayko 2009] HOFFMANN, J. ; GAYKO, J.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Kap. Fahrerwarnelemente, S. 343–354, Vieweg+Teubner, 2009
- [Huang 2003] HUANG, Pei-Shih: *Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften*, Technische Universität München - Lehrstuhl für Ergonomie, Dissertation, 2003
- [Iguchi 1959] IGUCHI, M.: A Study of Manual Control. In: *Journal of mechanical Society of Japan* 62(481) (1959)
- [Ishida u. a. 1999] ISHIDA, S. ; ASANUMA, N. ; IKEGAYA, M. ; KONDO, S.: Evaluation of a Driver Support System for Lane-Keeping. In: *International Symposium on Automotive Technology and Automation ISATA 99*, 1999
- [Ishida u. a. 1999] ISHIDA, S. ; ASANUMA, N. ; IKEGAYA, M. ; KONDO, S.: Evaluation of a driver support system for lane-keeping. In: *International Symposium on Automotive Technology and Automation*, 1999
- [Ishida u. a. 2003] ISHIDA, S. ; TANAKA, J. ; KONDO, S. ; SHINGYOJI, M.: The Method of a Driver Assistance System and Analysis of a Driver's Behavior. In: *ITS World Congress*, 2003
- [Jamson 2000] JAMSON, H.: Driving Simulation Validity: Issues of Field of View and Resolution. In: *Driving Simulators Conference*, 2000, S. 57–64
- [Ji u. a. 2004] JI, Q. ; ZHU, Z. ; LAN, P.: Real-Time Nonintrusive Monitoring and Prediction of Driver Fatigue. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004
- [Johanssen 1993] JOHANSEN, G. ; (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systeme*. Springer, 1993
- [Jürgensohn 1997] JÜRGENSOHN, T.: *Hybride Fahrermodelle*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1997

- [Jürgensohn und Timpke 2001] JÜRGENSOHN, T. ; TIMPKE, K.-P.: *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001
- [Kalmann 1960] KALMANN, R. E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. In: *JASME - ournal of Basic Engineering* 82 (Series D) (1960), S. 35–45
- [Kammel 2009] KAMMEL, S.: *Autonomes Fahren*. Kap. Autonomes Fahren, S. 657–663, Vieweg+Teubner, 2009
- [Kehl 2007] KEHL, S.: *Querregelung eines Fahrzeugs entlang vorgegebener Bahnen*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2007
- [Kiencke und Nielsen 2005] KIENCKE, U. ; NIELSEN, L.: *Automotive Control Systems - For Engine, Driveline and Vehicle*. Springer, 2005
- [Kiendl 1997] KIENDL, Harro ; KRAMMER, Elmar (Hrsg.): *Fuzzy Control methodenorientiert*. Oldenbourg Verlag München Wien, 1997
- [Kiesewetter u. a. 1997] KIESEWETTER, W. ; KLINKNER, W. ; REICHELT, W. ; STEINER, M.: Der neue Brake-Assist von Mercedes-Benz, Aktive Fahrerunterstützung in Notsituationen. In: *ATZ* 99 (6) (1997)
- [Kim und Oh 2003] KIM, S. Y. ; OH, S. Y.: A driver adaptive lane departure warning system based on image processing and a fuzzy evolutionary technique. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2003, S. 361–365
- [Kölbl und Zahn 2006] KÖLBL, C. ; ZAHN, P.: Entwicklung eines integrierten Quer- und Längsreglers zur Fahrzeugführung. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006*, 2006
- [Kluge und Thorpe 1992] KLUGE, K. ; THORPE, C.: Representation and Recovery of Road Geometry in YARF. In: *IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, 1992, S. 114–119
- [König 2009] KÖNIG, W.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Kap. Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen, S. 33–42, Vieweg+Teubner Verlag, 2009
- [König u. a. 2003] KÖNIG, W. ; WEISS, K. E. ; MAYSER, C.: S.A.N.T.O.S - A Concept for Integrated Driver Assistance. In: *Electronics Systems for Vehicles*. Baden-Baden, 2003. – [www.santos.web.de](http://www.santos.web.de)

- [Kopf 2005] KOPF, M.: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Kap. Was nützt es dem Fahrer, wenn Fahrerinformations- und -assistenzsysteme etwas über ihn wissen, Springer Heidelberg, 2005
- [Kraiss 1998] KRAISS, K.-F.: Benutzergerechte Automatisierung - Grundlagen und Realisierungskonzepte. In: *Automatisierungstechnik* 46 Band 10 (1998), S. 457–467
- [Luczak 1998] LUCZAK, H.: *Arbeitswissenschaft*. Springer Berlin, 1998
- [Lunze 2010] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. Springer, 2010
- [Mamdani 1975] MAMDANI, E.: An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. In: *International Journal on Man-Machine Studies* 7 (1975), S. 1–13
- [Meinecke 2010] MEINECKE, M.-M. et a.: Motion Model Estimation for Pedestrians in Street-Crossing Scenarios. In: *7th Workshop on Intelligent Transportation (WIT), Hamburg*, 2010
- [Mirtich und Canny 1992] MIRTICH, B. ; CANNY, J.: Using skeletons for non-holonomic path planning among obstacles. In: *International Conference on Robotics and Automation*, 1992, S. 2533–2540
- [Mitschke und Wallentowitz 2004] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer, 2004
- [Müller 2006] MÜLLER, D.: *Automatisches Spurfahren auf Autobahnen*. Kap. 13, S. 285–306, Vieweg ATZ/MTZ-Fachbuch, 2006
- [Naab und Reichart 1994] NAAB, K. ; REICHART, G.: Driver Assistance Systems for Lateral and Longitudinal Vehicle Guidance - Heading Control and Active Cruise Control. In: *Symposium on Advanced Vehicle Control - AVEC*, 1994
- [Nelder und Mead 1965] NELDER, J. A. ; MEAD, R.: A simplex method for function minimization. In: *Computer Journal* 7 (1965), S. 308–313
- [Noll 2009] NOLL, P.: *Statistisches Matching mit Fuzzy Logic*, Philipps-Universität Marburg, Dissertation, 2009
- [Omae und Shimizu 2006] OMAE, Manabu ; SHIMIZU, Hiroshi: Comparison of Lane-keep Assists by using Steering Torque, Steering Angular Velocity and Steering Angle. In: *The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, 2006

- [Pacejka 2006] PACEJKA, Hans B.: *Tyre and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann, 2006
- [Pattberg 2005] PATTBURG, B.: Der Wirklichkeit Nahe: Autofahren in der Simulation - Assistenzfunktionen sicher und effizient erproben. In: *Ignition* (2005), S. 60–63
- [Persson u. a. 1999] PERSSON, M. ; BOTLING, F. ; HESSLOW, E. ; JOHANSSON, R.: Stop & Go Controller for Adaptive Cruise Control. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications* (1999), S. 1692–1697
- [Pfeffer und Harrer 2011] PFEFFER, P. ; HARRER, M. ; SCHMITT, E. (Hrsg.) ; LANGE, E. (Hrsg.): *Lenkungsbandbuch*. Vieweg+Teubner, 2011
- [Pomerleau 1995] POMERLEAU, D.: RALPH: Rapidly Adapting Lateral Position Handler. In: *IEEE Conference on Intelligent Vehicles*, 1995, S. 506–511
- [PREVENT 2006] PREVENT: Response-Checkliste, Code of Practice for the Design of Evaluation of ADAS / PREVENT. 2006. – Forschungsbericht
- [Raithel 2008] RAITHEL, J.: *Quantitative Forschung - Ein Praxiskurs*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2008 (2)
- [Rauch u. a. 2008] RAUCH, N. ; GRADENEGGER, B. ; KRÜGER, H.-P.: Die SAGAT-Methode zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext. In: *45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie*, 2008
- [Reeds und Shepp 1990] REEDS, J. A. ; SHEPP, L. A.: Optimal paths for a car that goes both forward and backward. In: *Pacific Journal of Mathematics* (1990)
- [Reichart 2008] REICHART, G.: Situationsbewusstsein - Ein Konstrukt im Spannungsfeld von Intention, Erfahrung und Wahrnehmung. In: *BAST/FAT Symposium*, 2008
- [Reif 2010] REIF, K. ; (Hrsg.): *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, 2010
- [Reimann u. a. 2009] REIMANN, G. ; BRENNER, P. ; BÜRING, H.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Kap. Lenkstellensysteme, S. 287–324, Vieweg+Teubner, 2009

- [Renski 2001] RENSKI, A.: Identification of driver model parameters. In: *International journal of occupational safety and ergonomics, JOSE* 7(1) (2001), S. 79–90
- [Richter und Hendel 2008] RICHTER, D. ; HENDEL, M.: *Straßen- und Tiefbau*. Kap. Grundzüge der Straßenplanung, S. 33–57, Teubner Verlag, 2008
- [Riekert 1940] RIEKERT, T. E.: *Archive of Applied Mechanics*. Kap. Zur Fahrmechanik des gummiereiften Kraftfahrzeugs, S. 210–224, Springer, 1940
- [Rossetter 2003] ROSSETTER, E. J.: *A Potential Field Framework for Active Vehicle Lanekeeping Assistance*, Stanford University, Dissertation, 2003
- [Schieben u. a. 2008] SCHIEBEN, Anna ; DAMBÖCK, Daniel ; KELSCH, Johann ; RAUSCH, Herbert ; FLEMISCH, Frank: Haptisches Feedback im Spektrum von Fahrerassistenz und Automation. In: *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2008
- [Schlender 2008] SCHLENDER, D.: Simulatorkrankheit in Fahrsimulatoren. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 54(2) (2008), S. 74–80
- [Schmidt u. a. 2007] SCHMIDT, G. ; KISS, M. ; SWITKES, J. ; GERDES, C.: Auswirkungen haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug System. In: *Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*, 2007
- [Schmidt u. a. 2000] SCHMIDT, R. F. ; THEWS, G. ; LANG, F.: *Physiologie des Menschen*. Springer, 2000
- [Schmitz 2004] SCHMITZ, C.: *Adaptiver Spurverlassenswarner mit fahrerabsichts- und fahrerzustandsabhängiger Warnstrategie*, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2004
- [Schorn 2007] SCHORN, M.: *Quer- und Längsregelung eines Personenkraftwagens für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung*, TU Darmstadt, Dissertation, 2007
- [Schramm u. a. 2010a] SCHRAMM, D. ; HILLER, M. ; BARDINI, R.: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Springer, 2010
- [Schramm u. a. 2010b] SCHRAMM, D. ; LALO, W. ; UNTERREINER, M.: Application of Simulators and Simulation Tools for the Functional Design of Mechatronic Systems, 2010

- [Schwarz 2006] SCHWARZ, J.: Response 3 - Code of Practice for development, Validation and Market Introduction of ADAS - A PReVENT Project / Daimler. 2006. – Forschungsbericht
- [SENSODRIVE 2011] SENSODRIVE (Veranst.): *Sensodrive Datenblatt SENSO-Wheel SD-LC*. 2011
- [Sentouh u. a. 2006] SENTOUH, C. ; GLASER, S. ; MAMMAR, S. ; BESTAOUI, Y. ; LUSETTI, B.: Adaptive Lane Departure and Curve Negotiation Warning System. In: *The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control, AVEC 2006*, 2006
- [Siebert 2009] SIEBERT, André: *Untersuchungen zur Systemdynamik von Fahrer, Fahrzeug und Assistenzsystem unter Berücksichtigung von Fahrerklassen*, Universität Duisburg-Essen, Diplomarbeit, 2009
- [Stöbe 2006] STÖBE, M.: Die Fahrsimulatoren des DLR - Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten / Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. in der Helmholtz-Gemeinschaft. 2006. – Forschungsbericht
- [Stählin u. a. 2006] STÄHLIN, U. ; SCHORN, M. ; ISERMANN, R.: Notausweichen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung. In: *Autoreg 2006, VDI-Berichte Nr. 1931*, 2006
- [Stiller u. a. 2009] STILLER, C. ; BACHMANN, A. ; DUCHOW, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Kap. Maschinelles Sehen, S. 198–222, Vieweg+Teubner, 2009
- [Strobl 2003] STROBL, M. H.: SPIDER- The innovative software framework of the BMW Driving Simulation. In: *VDI Berichte 1745*, 2003
- [Switkes 2006] SWITKES, J. P.: *Handwheel Force Feedback with Lanekeeping Assistance: Combined Dynamics, Stability and Bounding*, Stanford University, Dissertation, 2006
- [Turner 1998] THURNER, T.: X-By-Wire: Safety Related Fault Tolerant Systems in Vehicles / X-by-Wire Consortium. Stuttgart, 1998 (DB-6/6-25). – Forschungsbericht
- [Tiemann u. a. 2010] TIEMANN, N. ; BRANZ, W. ; SCHRAMM, D.: Predictive Pedestrian Protection - Situation Analysis with a Pedestrian Motion Model. In: *AVEC 2010*, 2010

- [Tiemann 2009] TIEMANN, N. et. a.: Predictive Pedestrian Protection: Sensor Requirements and Risk Assessment. In: *Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2009
- [Treibner und Helbing 2002] TREIBNER, M. ; HELBING, D.: Realistische Mikrosimulation mit einem einfachen Modell. In: *16th Symposium Simulationstechnik ASIM*, 2002
- [Öttgen 2005] ÖTTGEN, O.: *Zur modellgestützten Entwicklung eines mechatronischen Fahrwerkregelungssystem für Personenkraftwagen*, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2005
- [UN-Konferenz 1968] UN-KONFERENZ: Convention on Road Traffic (Wiener Konvention) 8.11.1968 - BGBl. II 1977, 1968, S. 809–892
- [Venhovens u. a. 2000] VENHOVENS, P. ; NAAB, K. ; ADIPRASITO, B.: Stop and Go Cruise Control. In: *International Journal of Automotive Technology* 1 (2000), Nr. 2, S. 61–69
- [von Vietinghoff u. a. 2005] VIETINGHOFF, A. von ; HIEMER, M. ; KIENCKE, U.: Nonlinear Observer Design for Lateral Vehicle Dynamics. In: *16th IFAC World Congress*, 2005
- [Weilkes u. a. 2006] WEILKES, M. ; BÜRKLE, L. ; RENTSCHLER, T.: Lane-Keeping-Support: Von haptischer Spurverlassenswarnung zu semi-autonomer Spurführung. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006*, 2006
- [Welch und Bishop 2006] WELCH, G. ; BISHOP, G.: An Introduction to the Kalman Filtering. In: *Design* 7 (2006), S. 1–16
- [Wickens 1984] WICKENS, C. D.: *Engineering Psychology*. Upper Saddle River, 1984
- [Willumeit und Jürgensohn 1997] WILLUMEIT, H.-P. ; JÜRGENSOHN, T.: Fahrermodelle - ein kritischer Überblick (Teil 1). In: *Automobiltechnische Zeitschrift - ATZ* 99-7/8 (1997), S. 424–428
- [Winner u. a. 2009a] WINNER, H. ; DANNER, B. ; STEINLE, J.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Kap. Adaptive Cruise Control, S. 478–521, Winner, H. and Hakuli, S. and Wolf, G., 2009
- [Winner u. a. 2009b] WINNER, H. ; HAKULI, S. ; WOLF, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, 2009



- [Wolter u. a. 1997] WOLTER, T.-M. ; JÜRGENSOHN, T. ; WILLUMEIT, H.-P.: Ein auf Methoden basierendes Situations-Handlungsmodell des Fahrerverhaltens. In: *Automobiltechnische Zeitschrift - ATZ* 99 (1997), S. 142–149
- [Yi u. a. 2001] YI, K. ; MOON, I. ; KWON, Y.-D.: A Vehicle-to-Vehicle Distance Control Algorithm for Stop-and-Go Cruise Control. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings* - (2001), S. 478–482
- [Zadeh 1965] ZADEH: Fuzzy Sets. In: *Information and Control* 8 (1965), S. 338–353
- [Zambou 2005] ZAMBOU, N.: *Lagrange-basierte und modellgestützte Regelungsstrategie für die automatische Fahrzeugführung im Konvoi*, RWTH Aachen, Dissertation, 2005

